

Drucken organischer Feldeffekttransistoren: Prozessbezogene Analyse des Ladungsträgertransports

vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

D i s s e r t a t i o n

von
Dipl.-Chem. oec. Simone Ganz

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann

Darmstadt 2017

Ganz, Simone: „Drucken Organischer Feldeffekttransistoren: Prozessbezogene Analyse des Ladungsträgertransports“

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2018

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-73148

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2017

Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Kurzfassung

In Zeiten des Internets der Dinge und dem steigenden Bedarf nach leichten, flexiblen und vor allem kostengünstigen elektronischen Bauteilen, stellt die gedruckte organische Elektronik eine gute Ergänzung zur Siliziumtechnologie dar. Obwohl von materialtechnischer Seite die Performance des amorphen Siliziums bereits von organischen Feldeffekttransistoren übertroffen wird, bedarf es immer noch einer Optimierung der zur Herstellung eingesetzten Druckprozesse. Um diese anpassen zu können, müssen die Einflüsse, die durch den Prozess entstehen, erfasst und analysiert werden. Dieser Schritt bildet den ersten Aspekt dieser Arbeit. Doch wie lassen sich diese Einflüsse detektieren? Gedruckte Schichten werden im Allgemeinen optisch auf ihre Güte geprüft. Organische Transistoren werden anhand ihrer elektrischen Performance, meist durch statische Messung der Ausgangs- und Transferkennlinien, charakterisiert. Der zweite Aspekt dieser Arbeit besteht in der Frage, ob die beiden genannten Charakterisierungsmethoden ausreichen, um einen Druckprozess bezüglich der elektrischen Güte der gedruckten Transistoren zu optimieren. In diesem Zuge wird ebenfalls die Eignung des elektronischen Time-Of-Flight-Verfahrens bezüglich dieser Fragestellung getestet. Dieses dynamische Messverfahren basiert auf der Analyse der transienten Antwort eines Transistors auf einen angelegten Rechteckpuls und wird in dieser Arbeit erstmals zur Charakterisierung gedruckter organischer bottom-contact top-gate Transistoren eingesetzt. Ebenfalls neuartig ist die Art der Transformation der Transistorantwort in eine Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung. Diese Verteilung gibt die Häufigkeit der Ladungsträger einer bestimmten scheinbaren Geschwindigkeit an, mit der diese den Transistorkanal überquert haben, bevor sie an der Drain-Elektrode erfasst werden. Die genannten Verfahren werden eingesetzt, um gedruckte organische Feldeffekttransistoren zu charakterisieren, die auf den polymeren p-Halbleitern PIF8-TAA und lisicon® SP400 sowie dem polymeren Dielektrikum lisicon® D320 basieren. Es wird gezeigt, dass die Performance dieser Transistoren nicht allein von der Schichtdicke des Halbleiters, sondern auch von dessen Beschichtungsprozess an sich, d.h. in diesem Fall Spin-Coating, Flexodruck oder Tiefdruck, abhängt. In diesem Zusammenhang wird festgestellt, dass die durch statische bzw. dynamische Messungen hervorgebrachten Prozessfenster und Optima nicht identisch sind. Des Weiteren werden speziell im Tiefdruck die Einflüsse der Druckformgravur untersucht. Es kann ein eindeutiges Optimum des dynamischen Verhaltens für niedrige Lineaturen mit hohen Flächendeckungen gefunden werden. Bezüglich des Flexodrucks wird eine schlechtere Performance für mit Klischeematerial verunreinigte Halbleiterschichten festgestellt. Für gedruckte dielektrische Schichten kann gezeigt werden, dass dünne homogene Schichten die beste Transistorperformance liefern.

Abstract

In times of the internet of things and increasing demand for lightweight, flexible and cost-efficient electronic devices, printed organic electronics are a reasonable supplement to silicon-technology. Even though materials used in organic field-effect transistors have already outraced the performance of amorphous silicon in terms of materials, the printing processes that are used to produce them still need to be optimized. In order to adjust these processes, their influences need to be recorded and analyzed. This step forms the first aspect of this work. But how can these influences be detected? The quality of printed layers is usually controlled optically. Organic transistors are typically characterized electrically by static measurements, e.g. by recording their output and transfer characteristics. The second aspect of this work covers the question whether these characterization methods are sufficient for the optimization of printing processes regarding the electrical performance of a printed transistor. In this context, the electronic time-of-flight method is tested, too. This dynamic measurement method is based on the analysis of a transistors's transient response to a rectangular voltage pulse, and is used here for the first time, to characterize printed organic bottom-contact top-gate transistors. In addition to this, a new procedure of transforming the transient response into a charge carrier velocity distribution is introduced. This distribution represents the number of charge carriers that are featured with a certain apparent velocity with which the charge carriers are said to have passed the transistor channel before being detected at drain. The above mentioned methods are used to characterize printed bottom-contact top-gate organic field-effect transistors that are based on the p-type polymeric semiconductors PIF8-TAA and lisicon® SP400 as well as the on the dielectric lisicon® D320. It is shown that the performance of these transistors does not only depend on the thickness of the semiconducting layer, but also on the deposition process itself, e.g. spin-coating, flexographic printing and gravure printing in this case. In this context, process windows and optima are found not to be identical for static and dynamic measurements. Additionally, influences of the engraving of a gravure printing form are analyzed. Low screen frequencies and high tone values lead to an optimum in dynamic performance. For flexographic printing, a loss in performance is found for semiconducting layer that contain residuals that have come out of the flexographic printing plate. For dielectric layers, it can be shown that thin homogeneous layers deliver best transistor performances.

Danksagung

Ich möchte mich zu allererst bei Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam bedanken, für all die Unterstützung, fruchtbaren Diskussionen zu meiner Arbeit und die Arbeitsatmosphäre, die er geschaffen hatte. Besonders bedanken möchte ich mich auch für sein Vertrauen und die Aufgaben, die er mir zugetraut hat und durch die ich mich weiterentwickeln konnte.

Des Weiteren Danke ich Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann für die Übernahme des Zweitgutachtens und die gute Zusammenarbeit mit seinem Institut während der vergangenen fünf Jahre.

Ich möchte mich außerdem bei Dr. Hans Martin Sauer bedanken, für all die intensiven fachlichen Diskussionen und die Zeit, die er sich stets für diese genommen hat. Auch für seine Unterstützung während aller messtechnischen Herausforderungen möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner liebsten Kollegin und großartigen Freundin Christina Bodenstein. Du hast mir Sonnenschein gebracht, während all der Zeit, die ich hinter dem Bildschirm saß und warst mir immer eine riesige und sehr wichtige Stütze. Außerdem möchte ich mich bei Dr.-Ing. Constanze Ranfeld und Dr.-Ing. Maria Haas bedanken für Ihre fantastische Unterstützung in den letzten fünf Jahren und vor allem für Ihre Freundschaft, die ich nicht mehr missen möchte.

Mein tiefster Dank gilt auch meinen Korrekturlesern Robert Tone und Dieter Spiehl. Danke für Euer kritisches Lesen! Ein weiterer besonderer Dank gilt Thorsten Euler für seine Hilfe und fachlichen Beistand während unzähliger gemeinsamer Nachmittage zur Herstellung so vieler Transistoren. Ich möchte mich außerdem bei Felipe Fernandes und Simon Weißenseel für die gute Zeit in Büro 119 und dem gesamten Team des Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren für die wunderbare Zeit in den letzten fünf Jahren bedanken.

Ich möchte meinen Eltern, Günter und Renate, danken für all die Unterstützung und Liebe, die ich mein Leben lang erhalten habe. Ganz besonders möchte ich mich auch bei meiner großartigen Schwester Sabrina bedanken, nicht nur für all die Korrekturen, die sie gemacht hat, sondern vor allem weil sie immer für mich da war. Auch danke ich Carlotta und Aurelia, für all die Freude, die sie verbreiten.

Mein allergrößter Dank gilt meinem Jochen, der immer für mich da war, meine größte Stütze war und mir immer ein Lächeln ins Gesicht gezaubert hat, wenn ich es gebraucht habe.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	15
2. Gedruckte organische Feldeffekttransistoren	19
2.1 Organische Feldeffekttransistoren	19
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise	20
2.1.2 Ladungstransport in organischen Halbleitern	29
2.2 Druck- und Beschichtungsverfahren	33
2.2.1 Tiefdruck.....	34
2.2.2 Flexodruck.....	36
2.2.3 Spin-Coating.....	37
2.3 Gedruckte bottom-contact top-gate OFETs.....	38
2.3.1 Schichtmorphologie und ideale Grenzfläche.....	38
2.3.2 Schichtdickenabhängigkeit des Halbleiters	43
2.3.3 Schichtdickenabhängigkeit des Dielektrikums.....	44
2.3.4 Abweichungen in den Transistordimensionen durch Druckfehler.....	45
2.3.5 Verunreinigungen	46
3. Elektronisches Time-Of-Flight-Verfahren und Ladungsträgerschwindigkeitsverteilung	47
3.1 Theorie zum eTOF-Verfahren	47
3.1.1 Messprinzip und Aufbau.....	47
3.1.2 Vergleich von eTOF, optischer TOF und CELIV	53
3.1.3 Definition der Transitzeit	54
3.1.4 Parameterextraktion und Datenauswertung.....	55
3.1.5 Erkenntnisse aus eTOF-Messungen	60
3.2 Praktische Umsetzung des eTOF-Verfahrens an gedruckten OFETs.....	64
3.2.1 Vorbereitende statische Charakterisierung der Transistoren	64
3.2.2 Dynamische Charakterisierung der Transistoren	65
4. Herstellung organischer Feldeffekttransistoren.....	83
4.1 Schaltungssubstrat	83
4.2 Materialien.....	85
4.2.1 Self-assembled Monolayer	85
4.2.2 Halbleiter	85
4.2.3 Dielektrikum	86
4.3 Rheologische und oberflächenanalytische Charakterisierung	88

4.4 Substrat- und Bottom-Elektrodenvorbehandlung.....	88
4.5 Referenzprozess: Spin-Coating.....	90
4.6 Basisverfahren: Druckprozesse	91
4.6.1 Halbleiter: Flexodruck	91
4.6.2 Halbleiter: Tiefdruck	93
4.6.3 Dielektrikum: Tiefdruck	94
4.7 Optische Charakterisierung und Schichtdickenmessung.....	96
5. Ergebnisse und Diskussion	98
5.1 Einstellung der Eingangsparameter.....	98
5.1.1 Messwiderstand.....	98
5.1.2 Gate-Spannung.....	101
5.1.3 Pulshöhe.....	105
5.1.4 Photonische Injektion von Ladungsträgern	107
5.1.5 Prozessschwankungen	112
5.1.6 Interpretation der Kennwerte.....	122
5.2 Dynamisches und Statisches Verhalten gedruckter OFETs.....	126
5.2.1 Einfluss der Schichtdicke des Halbleiters.....	126
5.2.2 Einfluss des Druckprozesses	153
5.2.3 Einfluss der dielektrischen Schicht	192
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	210
7. Literaturverzeichnis	214
A. Anhang	228
A.1. Mobilität und Schwellspannung der ausgewählten Transistoren	228
A.2. Verteilungen, Kennwerte und Abweichungsanalysen.....	236
A.3. Trendtabellen	248
A.4. Matlab-Skript (GeschVert_RiseAndFall)	249
A.5. Sonstiges.....	262

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	-	Gütefaktor
ϵ_0	As/Vm	elektrische Feldkonstante
ϵ_r	-	relative Permittivität
λ	m	Wellenlänge
η	Pas	Dynamische Viskosität
σ	N/m	Oberflächenenergie
τ_{λ}^{rel}	s	Levelingzeit

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
B_{50}	m/s	Halbwertsbreite
c	%	Konzentration
C	F	Segmentkapazität
C_i	F	Gatekapazität
c_s	wt.-%	Feststoffanteil
d	m	Schichtdicke
E	J	Energie
E_F	eV	Fermi-Niveau
f_0	-	Attempt-to-Escape-Frequenz
G	-	Verstärkung
h_0	m	Schichtdicke unter der halben Amplitude der Inhomogenität
I_{ds}	A	Drain-Source-Strom
I_{gs}	A	Gate-Source-Strom
I_{Leck}	A	Leckstrom
L	m	Kanallänge

N	-	Anzahl an Atomen
N_{LT}	-	Anzahl an Ladungsträgern
N_{seg}	-	Anzahl an Segmenten
P	-	Population
$r_{i,j}$	-	Hopping-Rate
R_L	Ω	Messwiderstand
R_{trim}	Ω	Trimwiderstand
S	-	Benetzungsparameter
S_v	mL/m^2	Übertragungsvolumen im Tiefdruck bzw. Schöpfvolumen im Flexodruck
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
t_{ch}	s	Ladungszeit
t_m	s	Messzeit
t_p	s	Transportzeit
t_{tr}	s	Transitzeit
$t_{tr,off}$	s	Transitzeit der abfallenden Flanke
$t_{tr,on}$	s	Transitzeit der ansteigenden Flanke
$u_{i,j}$	-	Hopping-Schwierigkeit
V_{break}	V	Durchschlagsspannung
V_D	V	Antwortsignal
V_g	V	Gate-Spannung
v_{Druck}	m/s	Druckgeschwindigkeit
v_{LT}	m/s	Ladungsträgergeschwindigkeit
$v_{LT,dyn}$	m/s	Dynamische Ladungsträgergeschwindigkeit
$v_{LT,sat}$	m/s	statische Ladungsträgergeschwindigkeit
V_{max}	V	Höhe des angelegten Pulses
$v_{Vert-max}$	m/s	Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum
$v_{Vert-start}$	m/s	Ladungsträgergeschwindigkeit am Beginn der Verteilung
W	m	Kanalweite
y	%	Ausbeute

Abkürzungen und Akronyme

AO	<u>A</u> tom <u>o</u> rbital
CELIV	engl. <u>c</u> harge <u>e</u> xtraction by linearly increasing <u>v</u> oltage, dt. Ladungsextraktion bei linear ansteigender Spannung
DOS	engl. <u>d</u> ensity of <u>s</u> tates, dt. Verteilung der Zustände
eTOF	engl. <u>e</u> lectronic <u>t</u> ime-of- <u>f</u> light, dt. elektronische Laufzeit
EWG	engl. <u>e</u> lectron <u>w</u> ithdrawing group, dt. elektronenziehende Gruppe
FD	<u>F</u> lexo <u>d</u> ruck
HOMO	engl. <u>h</u> ighest <u>o</u> ccupied <u>m</u> olecular <u>o</u> rbital, dt. Höchstes besetztes Molekülorbital
IUPAC	<u>I</u> nternational <u>U</u> nion of <u>P</u> ure and <u>A</u> ppplied <u>C</u> hemistry
LCAO	engl. linear <u>c</u> ombination of <u>a</u> tom <u>i</u> c <u>o</u> rbital <u>s</u> , dt. Linearkombination der Atomorbitale
LUMO	engl. lowest <u>u</u> noccupied <u>m</u> olecular <u>o</u> rbital, dt. niedrigstes unbesetztes Molekülorbital
MO	<u>M</u> olekü <u>l</u> o <u>r</u> bital
MOSFET	engl. <u>m</u> etal- <u>o</u> xide- <u>s</u> emiconductor <u>f</u> ield- <u>e</u> ffect <u>t</u> ransistor, dt. Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
MIS-CELIV	engl. <u>m</u> etal- <u>i</u> nsulator CELIV, dt. Metall-Isolator-CELIV
MTR	engl. <u>m</u> ultiple <u>t</u> rapping and <u>r</u> elease, dt. Multiples Einfangen und Freilassen
OFET	<u>O</u> rganischer <u>F</u> eldeffekt <u>t</u> ranistor
OPV	engl. <u>o</u> rganic <u>p</u> hoto <u>v</u> oltaic, dt. Organische Photovoltaik
OSC	engl. <u>o</u> rganic <u>s</u> emiconductor, dt. Organischer Halbleiter
OTFT	engl. <u>o</u> rganic <u>t</u> hin <u>f</u> ilm <u>t</u> ransistor, dt. organsicher Dünnschichttransistor
P3HT	<u>P</u> oly(<u>3</u> - <u>h</u> exylthiophen-2,5-diyl)
PTAA	<u>P</u> oly(<u>t</u> ri <u>a</u> ry <u>a</u> min)
PIF8-TAA	<u>P</u> oly-(<u>I</u> ndenofluoren- <u>8</u> - <u>t</u> ri <u>a</u> ry <u>a</u> min)
RFID	engl. <u>r</u> adio- <u>f</u> requency <u>i</u> dentification, dt. Identifizierung durch Radiowellen
rpm	engl. <u>r</u> ounds <u>p</u> er <u>m</u> inute, dt. Umdrehungen pro Minute
SAM	engl. <u>s</u> elf- <u>a</u> ssembled <u>m</u> onolayer, dt. sich selbsanordnende Monolage

SC	<u>S</u> pin- <u>C</u> oating
TD	<u>T</u> ief <u>d</u> ruck
Tages-Vgl	Tagesvergleich
TFT	engl. <u>t</u> hin <u>f</u> ilm <u>t</u> ransistor, dt. Dünnschichttransistor
TOF	engl. time-of-flight, dt. die Flugzeit bzw. Laufzeit
VRH	engl. <u>v</u> ariable <u>r</u> ange <u>h</u> opping

Naturkonstanten (Atkins, 2006)

Bezeichnung	Symbol	Wert	Zehnerpotenz	Einheit
Elementarladung	e	1,602176	10^{-19}	C
Boltzmannkonstante	k_B	1,38065	10^{-23}	J/K

1. Einleitung und Zielsetzung

Transistoren begleiten den Menschen an jedem Tag in seinem Leben, ob im Smartphone, der Digitaluhr oder der Ankunftsanzeige der nächsten Straßenbahn. Daher ist es nicht verwunderlich, dass bereits 2004 mehr Transistoren auf der Welt produziert wurden als Reiskörner (Schulenburg, 2004). Klassische Transistoren basieren auf dotiertem Silizium. Dieses ist starr, nicht transparent und trotz des Eintretens des Moore'schen Gesetztes (Moore, 1998) immer noch aufwändig in der Herstellung. In Zeiten des Internets der Dinge und dem aufgekommenen Interesse an flexibler Elektronik, bedarf es einer leichten und gut integrierbaren Alternative, die sich vor allem auch zum Einsatz in Einwegprodukten eignet (Grau, 2016). Bereits vor 30 Jahren wurde von *Tsumura* (1986) der erste Transistor dokumentiert, der auf einem organischen Halbleiter beruht und somit das Potential zur Erfüllung genannter Eigenschaften hatte. Der Weg zur flexiblen Elektronik war geebnet. Aufgrund der schwachen Performance (Mobilität $< 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) blieb die organische Elektronik jedoch für fast zwei Jahrzehnte Forschungsgegenstand weniger Gruppen, die sich hauptsächlich mit der Verbesserung der elektronischen Eigenschaften beschäftigten (Horowitz, 2009; Sirringhaus, 2014). Aktuell können Mobilitäten größer $1\text{-}10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ erreicht werden. Diese übersteigen sogar die des amorphen Siliziums (Sirringhaus, 2014). Heute lassen sich mit organischen Transistoren kleinere Bauteile wie beispielsweise RFID-Tags oder einfache Sensoren zur Überwachung von Liefer- und Kühlketten realisieren (Grau, 2016) sowie vollständige Mikroprozessoren (Sirringhaus, 2014).

Ein entscheidender Punkt zum Eintritt in den Markt ist neben der materialbedingten elektrischen Performance eine kostengünstige Herstellungsweise. Hier hielten die Drucktechnologien Einzug in das Gebiet der flexiblen Elektronik (Perelaer, 2010; Fukuda, 2016). Drucktechnologien stehen für etablierte Hochdurchsatzverfahren, die gegebene Muster exakt reproduzieren können. In klassischen Druckverfahren wird Farbe meist in Form einer flüssigen Tinte oder Paste übertragen. Organische funktionelle Materialien, d. h. Leiter, Halbleiter und Isolatoren, lassen sich durch die Herstellung von Lösungen oder Dispersionen in die flüssige Phase überführen, und können somit mittels Drucktechnologien prozessiert werden (Fukuda, 2016; Sirringhaus, 2005). Die Drucktechnologie, als additives Herstellungsverfahren, überzeugt durch die Einfachheit der Prozesse gegenüber den üblicherweise in der Mikroelektronik eingesetzten Verfahren, die meist subtraktiver Natur sind und auf aufwändigen Ätz- und Vakuumtechnologien beruhen (Grau, 2016).

Einher mit der Prozessierung aus flüssiger Phase gehen auch neue Einflussparameter auf das funktionale Bauteil. Inhomogenitäten in der Oberfläche und der Morphologie der Schichten können in

flüssigprozessierten Schichten in viel höherem Maß als in Aufdampfverfahren, wie sie beispielsweise für organische Leuchtdioden (engl. *organic light emitting diodes*, kurz OLEDs) Einsatz finden (Höfle, 2014), entstehen. Ungeklärt ist jedoch noch, inwiefern sich die Einflüsse aus dem Druckprozess auf die Funktionalität der Transistoren auswirken und mit welchem Messverfahren diese sich erfassen lassen. In der Druckindustrie erfolgt die Beurteilung einer gedruckten Schicht anhand ihrer optischen Güte. Es stellt sich die Frage ob eine Beurteilung der optischen Güte einer funktionalen Schicht zur Beurteilung der elektrischen Performance ausreicht. In lichtemittierenden Schichten, wie sie in OLEDs gegeben sind, wirken sich Inhomogenitäten direkt auf die Homogenität der leuchtenden Fläche aus (Raupp, 2017). In organischen Transistoren existiert kein solcher optischer Output. Sie können ausschließlich anhand elektrischer Messungen charakterisiert werden. Im Allgemeinen erfolgt dies anhand von Kennlinien und einer Reihe von aus diesen extrahierten Kennwerten wie beispielsweise die Mobilität oder die Schwellspannung (Gomes, 2016).

Das Ziel dieser Arbeit teilt sich in zwei Aspekte: Erstens soll der Einfluss von Druckprozessparametern auf die elektrische Performance organischer Feldeffekttransistoren (engl. *organic field-effect transistor*, kurz OFETs) untersucht werden. Die Beantwortung der Frage, ob sich die üblicherweise eingesetzten Methoden der optischen Charakterisierung einer Schicht sowie der Kennlinienanalyse der Transistoren, ausreichen um den Herstellungsprozess hinsichtlich der Transistorperformance optimieren zu können, ergibt den zweiten Aspekt in dieser Arbeit. In diesem Zusammenhang soll ein alternatives Verfahren daraufhin geprüft werden, ob es zur Feststellung der Einflüsse aus dem Druckprozess geeignet ist, das elektronische Time-Of-Flight-Verfahren. Dass dieses Verfahren Unterschiede zwischen verschiedenen Herstellungsverfahren darstellen kann, ist bereits gezeigt worden (Ganz, 2013b; Pankalla, 2014; Pankalla, 2013b). Die Nutzung des elektronischen Time-Of-Flight-Verfahrens zur Charakterisierung organischer Transistoren ist bislang nur anhand von aus der Gasphase abgeschiedenen oder im Spin-Coating erzeugten Halbleitern in einer bottom-gate Struktur bekannt. Die Anwendung an bottom-contact top-gate Transistoren, deren Halbleiter und Dielektrika gedruckt sind, ist nach aktuellem Wissensstand nur in eigenen Veröffentlichungen bzw. Beteiligungen an diesen dokumentiert. Ebenfalls wird eine neuartige Auswertemethodik vorgestellt: Die im elektronischen Time-Of-Flight-Verfahren erzeugte transiente Antwort des Transistors auf einen Rechteckpuls wird anhand einer von Sauer (2015) entwickelten Gleichung in eine Geschwindigkeitsverteilung der durch den Puls bewegten Ladungsträger im Kanal transformiert. Zur quantitativen Beschreibung dieser Verteilung werden Kennwerte definiert, die sowohl Form als auch Lage der Verteilung umfassen. Die Prüfung der Abhängigkeit dieser Kennwerte von bestimmten Prozessparametern bildet die Bewertungsgrundlage der Untersuchungen. Bezüglich der

Eignung zur Detektion von Einflüssen aus dem Druckprozess werden also die üblicherweise verwendete Analyse von Transistorkennlinien zur Ermittlung des statischen Verhaltens, die optische Beurteilung anhand von Mikroskopaufnahmen und das elektronische Time-Of-Flight-Verfahren zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens untersucht. Im Anschluss an diese Einleitung ist die Arbeit wie folgt aufgebaut:

In Kapitel 2 werden die Grundlagen organischer Feldeffekttransistoren sowie der Beschichtungsverfahren Tiefdruck, Flexodruck und Spin-Coating vorgestellt. Erstere beginnen mit der Beschreibung organischer Halbleiter an sich und gehen über den Aufbau und die Funktionsweise dieser Transistoren in eine Darstellung des Ladungstransports in organischen Materialien über. Dies beinhaltet auch die Beschreibung der üblicherweise zur Charakterisierung genutzten Kennlinien. Die Erläuterung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Druck- und Beschichtungsverfahren leitet über zu einer abschließenden Zusammenfassung der charakteristischen Eigenschaften von gedruckten bottom-contact top-gate OFETs.

Zur Analyse dieser charakteristischen Eigenschaften wird das elektronische Time-Of-Flight-Verfahren eingesetzt. Die Vorstellung dieses, in Kapitel 3, teilt sich in zwei Abschnitte: Zunächst werden die Theorie hinter dem Verfahren und der Stand der Technik durch Vorstellung von publizierten Messaufbauten und Ergebnissen zusammengefasst. Im Anschluss erfolgt eine Beschreibung der praktischen Umsetzung des Verfahrens, d.h. des in dieser Arbeit verwendeten Messaufbaus sowie der zugehörigen Auswertemethodik. Letztere wird in drei Stufen mittels MATLAB® umgesetzt.

Im folgenden Kapitel 4 erfolgt die Vorstellung der in dieser Arbeit verwendeten Materialien sowie die Versuchsbeschreibung zur Herstellung der gedruckten organischen Feldeffekttransistoren. Neben der Versuchsvorschrift für den Referenzprozess Spin-Coating liegt hier der Fokus auf der Vorstellung der sogenannten Basisverfahren. Die Basisverfahren enthalten die Beschreibung der – je nach Material und Druckmaschine – üblicherweise zur Herstellung verwendeten Versuchsparameter. Von diesen Basisverfahren gehen alle Parametervariationen in dieser Arbeit aus. Des Weiteren werden die Messvorschriften sowie verwendeten Geräte der optischen, rheologischen und oberflächenspezifischen Analysen aufgeführt.

In Kapitel 5 erfolgt die Untersuchung des dynamischen Verhaltens gedruckter organischer Feldeffekttransistoren durch das elektronische Time-Of-Flight-Verfahren. Im ersten Abschnitt werden die Einflüsse der Messparameter dieses Verfahrens, sowie auf dem Druckprozess basierende Prozessschwankungen vorgestellt und diskutiert. Der zweite Abschnitt ist untergliedert in die

Untersuchung des Einflusses der Schichtdicke des Halbleiters, des Druckprozesses an sich sowie der dielektrischen Schicht. Einleitend wird für jeden dieser Einflüsse eine Hypothese aufgestellt, die anschließend anhand der Ergebnisse aus dem statischen Kennlinienverhalten und der dynamischen elektronischen Time-Of-Flight-Messungen diskutiert wird. So wird in Hypothese 1 geprüft ob die Performance organischer Feldeffekttransistoren ausschließlich von der Schichtdicke des Halbleiters und nicht vom Herstellungsprozess abhängt. Die Hypothese 2 befasst sich mit der Fragestellung, ob optische und statische Charakterisierungsmethoden ausreichen um einen Druckprozess bezüglich der Transistorperformance einzustellen. Die Eignung des Flexodrucks für die Herstellung organischer Transistoren ist Inhalt von Hypothese 3. In Hypothese 4 wird der Einfluss der Schichtdicke der dielektrischen Schicht im Transistor behandelt. Abschließend erfolgt jeweils eine Beurteilung der Hypothesen.

In dieser Arbeit werden insgesamt 100 Substrate mit je 27 bottom-contact top-gate Transistoren untersucht, die auf den Halbleitern Poly-(Indenofluoren-8-triarylamin) (kurz PIF8-TAA) und lisicon® SP400 sowie dem Dielektrikum lisicon® D320 beruhen. Die Arbeiten zu diesen Transistoren allgemein und zu den elektronischen Time-Of-Flight-Messungen im speziellen wurden im Rahmen des Spitzenclusterprojekts POLYTOS (Förderkennzeichen: 13N12088) gemeinsam mit Sebastian Pankalla (Pankalla, 2014) begonnen und im Rahmen des BMBF Verbundprojekts POESIE (Förderkennzeichen: 13N13693) fortgesetzt. Das Substrat, die Transistordimensionen und -architektur, sowie die Materialauswahl – mit Ausnahme von lisicon® SP400 – waren im Projekt vorgegeben.

2. Gedruckte organische Feldeffekttransistoren

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen organischer Feldeffekttransistoren erläutert. Diese umfassen *organische Halbleiter* an sich, den *Aufbau und die Funktionsweise* der organischen Transistoren sowie die Mechanismen des *Ladungstransports* in ihnen. Im Anschluss daran erfolgt eine Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten *Druck- und Beschichtungsverfahren*. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Erläuterung der Besonderheiten, die durch die Herstellung aus flüssiger Phase bzw. durch Druckprozesse im Speziellen entstehen (*Gedruckte bottom-contact top-gate OFETs*).

2.1 Organische Feldeffekttransistoren

Transistoren sind aufgebaut aus einem Halbleiter, einem Dielektrikum und dreierlei Elektroden. Organische Transistoren sind definiert als Transistoren, in denen mindestens die Halbleiterschicht aus organischen Materialien besteht (Clemens, 2003). Der erste ihrer Art konnte 1986 von Tsumura *et al.* (1986) vorgestellt werden. Er enthielt Polythiophen als Halbleiter und konnte eine Mobilität von $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ aufweisen. Bis heute wurden nicht nur zahlreiche neue Halbleitermaterialien dokumentiert, sondern auch organische Dielektrika und Leiter. Organische Transistoren werden den Dünnschichttransistoren (engl. *thin film transistor*, kurz *TFT*) zugeordnet, welche eine Unterart der Feldeffekttransistoren bilden. Geläufig sind die englischen Begriffe *organic thin film transistor* oder *organic field-effect transistor*, bzw. deren Akronyme *OTFT* und *OFET*. Die Funktionalität von Feldeffekttransistoren beruht auf einem äußeren elektrischen Feld, welches die Leitung von Ladungsträgern im sogenannten Transistorkanal reguliert. Dünnschichttransistoren wiederum charakterisieren sich dadurch, dass sich dieser leitende Kanal durch eine Akkumulationsschicht an Stelle von Inversion, wie im bekannten Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (engl. *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*, kurz *MOSFET*), ausbildet. (Gomes, 2016)

Die Vorteile organischer Feldeffekttransistoren gegenüber klassischer Silizium-basierter MOSFETs sind zum einen ihre mechanische Flexibilität, da sie auf Foliensubstraten hergestellt werden können, und zum anderen die Möglichkeit zur kostengünstigen Massenproduktion durch additive Herstellungsverfahren. Wahrscheinliche Einsatzgebiete sind von daher niedrigpreisige Einwegprodukte wie RFID-Tags, Sensoren, z.B. auf Lebensmittelverpackungen, oder flexible Displays (Grau, 2016; Dost, 2007; Sirringhaus, 2005), wobei gerade bei Displays die Realisierbarkeit einer zu der klassischen Halbleiterindustrie vergleichbare Performance unter gleichzeitiger Haltbarkeit noch in der Diskussion steht (Sirringhaus, 2014).

Dieses Kapitel befasst sich zunächst mit dem *Aufbau und der Funktionsweise* der organischen Feldeffekttransistoren. Hierfür werden Halbleiter im Allgemeinen und schließlich die Besonderheiten der organischen Halbleiter vorgestellt. Nachfolgend werden sowohl die möglichen *OFET-Architekturen* als auch die *Funktionsweise eines OFETs* beschrieben. Eine Erläuterung des *Ladungstransports* in organischen Halbleitern wird im Anschluss gegeben. Diese unterteilt sich in die Beschreibung des *bandähnlichen* und des *Hopping-Transports*.

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Wie einleitend erwähnt, wird ein OFET stets aus einem Halbleiter, einem Dielektrikum und einem Satz Elektroden aufgebaut. Der Halbleiter bildet hier den wohl wichtigsten Part. Um die Besonderheiten organischer Halbleiter vorstellen zu können, werden in diesem Zuge zunächst Halbleiter an sich beschrieben. Die Architektur des Transistors, d.h. die Anordnung der Komponenten zueinander, sowie die Funktionsweise im OFET werden nachfolgend vorgestellt.

2.1.1.1 Organische Halbleiter

Organische Halbleiter (engl. *organic semiconductors*, kurz *OSC*) sind die aktiven Materialien der drei Hauptbauteile der gedruckten organischen Elektronik: Organischer Feldeffekttransistoren, organischer Licht Emittierender Dioden und organischer Photovoltaik (engl. *organic photovoltaic*, kurz *OPV*). Trotz ihrer Entdeckung in den späten 1940er Jahren, kam ihr Durchbruch erst 40 Jahre später mit der Herstellung der ersten Bauteile, wie der des OFETs 1986 durch *Tsumura* (Pankalla, 2014).

Organische Halbleiter sind ebenso wie anorganische Halbleiter definiert als Material, das bei 0 K ein Isolator ist, bei Raumtemperatur aber eine elektrische Leitfähigkeit aufweist (Horowitz, 2009). Doch wie können Festkörper überhaupt elektrische Leitfähigkeit aufweisen? Dies lässt sich leicht am Beispiel der Alkalimetalle erklären, da sie nur ein Valenzelektron aufweisen. Wird näherungsweise von festen Bindungen im Festkörper ausgegangen, so bilden die Valenzelektronen durch Kombination ihrer Atomorbitalen (kurz AOs) Molekülorbitalen (kurz MOs) aus, die sich über den Atomverbund erstrecken. Die Beschreibung von Molekülorbitalen entstammt der gleichnamigen *Molekülorbitaltheorie* (kurz MO-Theorie) von *Mulliken und Hund* aus dem Jahre 1928. Diese ist eine quantenphysikalische Theorie, die ein auf den wellenmechanischen Eigenschaften der Elektronen beruhendes Modell der chemischen Bindung beschreibt. Sie besagt, dass zur Erreichung des Elektronenoktetts der Bereich der Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Valenzelektronen von einem Atomkern auf mehrere Kerne der

Bindung erweitert wird. Gehen zwei Atome eine Bindung ein, so müssen die Wellenfunktionen ihrer Valenzelektronen miteinander kombiniert werden, um eine gemeinsame Funktion für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen zu bilden. Bei dieser Linearkombination (engl. *linear combination of atomic orbitals*, kurz *LCAO*) der Wellenfunktionen kommt es bei additiver Kombination zur Bildung des bindenden Orbitals (aus zwei s-AOs entsteht ein sogenanntes σ -MO) und bei subtraktiver Kombination zur Bildung des sogenannten antibindenden Orbitals (ein sogenanntes σ^* -MO). Dies ist vergleichbar mit der aus der Optik bekannten konstruktiven und destruktiven Interferenz elektromagnetischer Wellen. Als Beispiel ist das MO-Diagramm des Moleküls Ethen in Abbildung 2.1 dargestellt. Je eines der drei sp^2 -Orbital jedes Kohlenstoffatoms bilden ein σ - und ein σ^* -Orbital. Die Bildung der π -Orbitale ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht von Interesse und wird im späteren Verlauf dieses Kapitels erläutert.

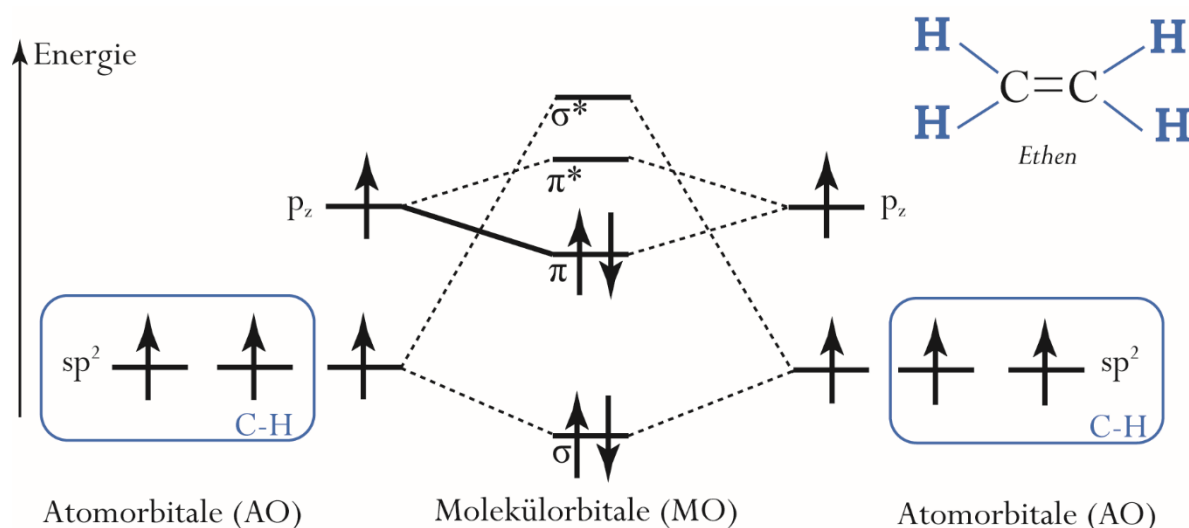


Abbildung 2.1: Molekülorbitaldiagramm von Ethen, dessen Strukturformel in der oberen rechten Ecke dargestellt ist. Nachgezeichnet nach *Bao und Locklin (2007)* sowie um die Zuordnung der C-H-Bindung und die Molekülstruktur ergänzt.

Im Beispiel der Alkalimetalle kombiniert in einem Verbund von N Atomen das Valenzelektron eines jeden Atoms, das als alleiniges Valenzelektron ein s-Orbital besetzt, mit den s-Orbitalen der $N-1$ Nachbaratome im Festkörper. Durch LCAO entstehen aus N Atomorbitalen aufgrund der Konservierung N Molekülorbitale; die Hälfte davon bindend, die andere antibindend. Für sehr große N , wie es in einem Festkörper gegeben ist, wird der Abstand zwischen den benachbarten Energieniveaus sehr klein. Es entsteht ein *Band* an Energien. Die MOs dieses Bandes gilt es nun mit den N vorhandenen Elektronen zu besetzen. Wird das System bei 0 K betrachtet, so werden zunächst die energetisch niedrigsten MOs

besetzt. Nach den Regeln von Hund und Pauli besetzen die Elektronen die tiefsten $N/2$ Orbitale, da je zwei Elektronen unterschiedlichen Spins ein Orbital besetzen. Dabei kristallisieren sich zwei Orbitale heraus, die fortan von großem Interesse sind: das höchste besetzte Orbital (engl. highest occupied molecular orbital, kurz *HOMO*) und das niedrigste unbesetzte Orbital (engl. lowest unoccupied molecular orbital, kurz *LUMO*). Das HOMO wird in einem System bei 0 K auch *Fermi-Niveau* E_f genannt. Im Fall der hier betrachteten Alkalimetalle grenzt das HOMO direkt an das LUMO an. Für die Anregung der Elektronen aus dem HOMO ist somit quasi keine Energie nötig. Die elektrische Leitfähigkeit ist dadurch ermöglicht. Erhöht man nun die Temperatur, werden Elektronen aufgrund der Atombewegung angeregt. Der Ladungstransport kann mit Hilfe des *Drude Modells* beschrieben werden. Dieses besagt, dass Ladungsträger sich unter Einfluss eines elektrischen Feldes frei im Band bewegen können. Stöße durch Gitterschwingungen (Phononen) oder Verunreinigungen begrenzen jedoch die Beweglichkeit der Ladungsträger. Diese nimmt aufgrund der Zunahme dieser Stöße mit steigender Temperatur ab.

Bei Betrachtung von Atomen, die zwei anstelle von nur einem Valenzelektron besitzen, würden bei 0 K alle Molekülorbitale besetzt. Das Fermi-Niveau E_f bildet nun die obere Grenze des Bandes. Bis zum nächsten Band, dem der p-Atomorbitale, ist eine energetische Lücke vorhanden, die sogenannte *Bandlücke*. Man nennt die beiden Bänder nun *Valenzband* (energetisch niedriger) und *Leitungsband* (energetisch höher). Die Besetzung oder auch Population P der Orbitale mit Energie E kann beschrieben werden durch eine sogenannte *Fermi-Dirac-Verteilung*, siehe Gleichung 2.1. Sie ergibt sich aus einer Boltzmann-Verteilung unter der Berücksichtigung des Pauli Prinzips.

$$P = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_f}{k_B \cdot T}\right) + 1} \quad \text{Gleichung 2.1}$$

mit der Fermienergie E_f , der Boltzmannkonstante k_B und der Temperatur T . Mit zunehmender Temperatur ragt der Randbereich der Verteilung immer mehr in das nächsthöhere Band hinein. Die Elektronen können nun das Leitungsband besetzen und sind dort frei beweglich. Dabei lassen sie Lücken im Valenzband zurück, sogenannte *Löcher*, welche formal eine positive Ladung tragen. Auch diese sind frei im Valenzband beweglich. Ladungen können somit transportiert werden, die elektrische Leitfähigkeit ist gegeben.

In Bezug auf die anfängliche Definition des Halbleiters, wird deutlich, dass letzteres Beispiel einen Halbleiter darstellt. Bei einem Isolator hingegen ist die Bandlücke so groß, dass sie durch thermische Anregung nicht überwunden werden kann. Die zu Beginn dieses Abschnitts vorgestellte Definition von Halbleitern entspricht der Definition von *intrinsischen* Halbleitern. Im Gegensatz dazu

stehen *extrinsische* Halbleiter, deren Leitfähigkeit durch Dotierung entsteht. Aufgrund von Dotierung, d.h. durch das Einbringen von Fremdatomen in den Verband, entstehen lokalisierte energetische Zustände in der Nähe des Leitungsbandes, auch n-Dotierung genannt, bzw. in der Nähe des Valenzbandes, auch p-Dotierung genannt. Die benötigte Anregungsenergie eines Elektrons aus dem Valenzband heraus oder in das Leitungsband hinein wird somit auf ein Niveau gesenkt, das durch thermische Aktivierung erreicht werden kann. (Atkins, 2006; Bruice, 2007; Riedel, 2004; Horowitz, 2007; Horowitz, 2009)

Organische Halbleiter sind keine homoatomaren Verbindungen, wie im obigen Abschnitt beschrieben, sondern kohlenwasserstoffbasierte Polymere oder sogenannte kleine Moleküle, die intermolekular durch schwache van-der-Waals Kräfte verbunden sind (Sirringhaus, 2014). Per Definition ist ein Polymer ein Makromolekül mit hoher relativer Molekularmasse, das sich aus sich wiederholenden Molekülen niedriger relativer Molekularmasse, den sogenannten Monomeren, zusammensetzt. Eine hohe relative Molekularmasse definiert sich über die Tatsache, dass sich die wesentlichen Eigenschaften des Moleküls nicht durch Hinzufügen oder Wegnehmen weniger Monomere ändert (IUPAC, 2014). Die verwendeten Monomere enthalten häufig Aromaten oder Heteroaromaten, d.h. Aromaten, die auch andere Elemente als Kohlenstoff enthalten. Das wohl bekannteste Beispiel ist ein schwefelenthaltender Fünfring, das *Thiophen*, und das auf ihm beruhende Polymer Poly-(3-hexylthiophen) (kurz *P3HT*). Das leitende Gerüst der organischen Halbleiter wird jedoch hauptsächlich aus Kohlenstoffatomen aufgebaut. Das Besondere an diesen Verbindungen ist die Doppelbindung. Die Kohlenstoffatome liegen sp^2 -hybridisiert vor, d.h. sie besitzen drei in einer Ebene liegende sp^2 -Orbitale im Winkel von 120° sowie ein senkrecht dazu stehendes p_z -Orbital. Kommt es zur Bindung, so überlappen zunächst zwei sp^2 -Orbitale in der Ebene der Kernverbindungsachse und bilden eine σ -Bindung aus, bei der sich die Elektronendichte rotationssymmetrisch um diese Achse verteilt. Die auf der Ebene stehenden p-Orbitale überlappen ebenfalls und bilden eine π -Bindung aus, bei welcher die Elektronendichteverteilung nicht mehr rotationssymmetrisch verteilt ist, sondern oberhalb und unterhalb der Kernverbindungsachse liegt. π -Bindungen sind weniger stark als σ -Bindungen, d.h. der Energiegewinn der durch Besetzung des π -MOs entsteht, ist geringer als der für das σ -MO, siehe Abbildung 2.1. Um maximale Überlappung der p-Orbitale erreichen zu können, müssen diese exakt parallel zueinanderstehen. Die Elektronen der p-Orbitale können sich nun frei im sich über zwei Atomkerne erstreckenden π -Orbital bewegen. Durch die Verwendung *konjugierter Bindungen*, d.h. die alternierende Aneinanderreihung von Einfach- und Doppelbindungen, kann eine Delokalisierung der Elektronen über das gesamte Rückgrat entstehen. Ladungen können somit entlang eines Moleküls transportiert werden. Jedoch verläuft dieser Transport nicht analog zum Transport im Leitungs- oder Valenzband, da keine Bänder in vergleichbarer Güte in organischen Halbleitern erzeugt werden können.

Eine ausführliche Darstellung des Ladungstransports ist in Abschnitt 2.1.2 gegeben. (Basu, 2007; Bruice, 2007; Riedel, 2004; Andersson, 2016; Pankalla, 2014; Leo, 2017)

Für die Besetzung der im Halbleiter entstehenden Molekülorbitale gibt es verschiedene Möglichkeiten (Köhler, 2015). Sind nur die niedrigsten Orbitale jeweils doppelt besetzt, so spricht man vom *Grundzustand*. Wird ein Elektron in ein höheres Orbital angehoben, weicht der Zustand vom Grundzustand ab. Man nennt ihn *angeregten Zustand*. Verschiedene Besetzungsmuster, aus denen gleiche Bindungsenergien resultieren, werden als Zustände zusammengefasst. Ein bekanntes Beispiel sind der Singulett und der Triplettzustand. Für den Triplettzustand gibt es mehrere Möglichkeiten der Orbitalbesetzung. Diese werden jedoch in einem Zustand zusammengefasst. Die in einem Halbleiter entstehenden energetischen Zustände unterliegen einer bestimmten Verteilung. Man spricht von der Verteilung der Zustände (engl. *density of states*, kurz *DOS*). Laut vorherrschender Meinung verläuft die Verteilung in anorganischen Halbleitern exponentiell, während in organischen Halbleitern eine Gauss-Verteilung angenommen wird (Oelerich, 2015). Grenzen dieser Verteilung konnten jedoch bereits aufgezeigt werden und es existieren erweiterte Modelle, die die Verteilung beispielsweise durch eine Mischung aus exponentiellem und Gauss-Verhalten beschreiben (Shi, 2016). Es ist hier anzumerken, dass die DOS oder Zustände im Allgemeinen nicht äquivalent mit dem HOMO oder dem LUMO darstellbar sind, da es sich bei letzteren um Orbitale und nicht um Zustände handelt (Köhler, 2015).

Organische Halbleiter werden nach dem Ladungsträgertyp kategorisiert, der primär durch sie transportiert wird. Analog zu den anorganischen Halbleitern werden Elektronenleiter n-Typ oder n-Leiter genannt und Lochleiter p-Typ oder p-Leiter. Aber im Gegensatz zu anorganischen Materialien sind organische Halbleiter intrinsische Halbleiter (Klauck, 2009). Der Ladungstransport beruht daher nicht auf dem Dotanten, wie im Silizium, sondern auf der Lage des HOMOs und des LUMOs in Bezug auf das Fermi-Niveau E_F des verwendeten Metallkontakts und auf der angelegten Spannung. Die Bezeichnung p- und n-Typ Halbleiter ist somit keine absolute Bezeichnung. Liegt das HOMO näher am Fermi-Niveau so können Löcher leichter injiziert werden als Elektronen. Es handelt sich somit um eine p-Leitung. Liegt das LUMO näher am Fermi-Niveau, handelt es sich um einen n-Leiter (Horowitz, 2009). Sehr bekannte und mittlerweile genau untersuchte Beispiele für organische p-Halbleiter sind die polymeren Halbleiter P3HT und Poly(triarylamine) (kurz PTAA) sowie das p-leitende kleine Molekül Pentacen. Ob Elektronen oder Löcher die Majoritätsladungsträger bilden, hängt, wie bereits erwähnt, von der Lage der Energieniveaus ab und kann somit gesteuert werden. Im Falle der n-Halbleiter kann beispielsweise durch stark elektronenziehende Gruppen (engl. *electron withdrawing group*, kurz *EWG*) eine Verschiebung erreicht werden (Facchetti, 2007). Lochleitende Halbleiter kommen häufiger vor als elektronenleitende,

da letztere zum einen häufig instabil gegenüber äußeren Einflüssen wie Sauerstoff und Luftfeuchte sind (Horowitz, 2009) und es zum anderen kaum passende Elektrodenmaterialien mit der entsprechend hohen Austrittsarbeit gibt (Sirringhaus, 2007). Des Weiteren sind n-Polaronen anfälliger für Fallenzustände¹ (Gershenson, 2006). Ein Polaron ist ein Quasiteilchen, das aus einem Elektron oder Loch und seiner durch es polarisierten Umgebung besteht (Basu, 2007). Die Polarisierung entsteht durch die Verzerrung des den Ladungsträger umgebenden Gitters. Unter den rar vorkommenden n-Halbleitern bilden die Oligothiophene eine bekannte Gruppe.

Organische Halbleiter werden außerdem nach ihrer Materialklasse bzw. nach ihrem Molekulargewicht klassifiziert. Somit ergibt sich für Polymere ein Molekulargewicht > 10.000 g/Mol (Lechner, 2014) und für kleine Moleküle (engl. *small molecules*) ein Gewicht von < 10.000 g/Mol (Bornemann, 2013). Eine weitere Klassifizierung erfolgt auf Basis der ihrer Filmbildungseigenschaften, d.h. es wird zwischen amorphen und (teil-)kristallinen Halbleiterschichten unterschieden. Bei den oben genannten Beispielen bildet z.B. PTAA amorphe Schichten, P3HT ist meist teil- bis mikrokristallin und das kleine Molekül Pentacen ist im Allgemeinen mikrokristallin (Sirringhaus, 2005).

2.1.1.2 OFET- Architektur

Wie einleitend erwähnt, basieren OFETs auf vier Komponenten. Diese sind die Elektroden - *Source* (dt. Quelle) und *Drain* (dt. Senke oder Abfluss) sowie *Gate* (dt. Tor), der Halbleiter, das Dielektrikum und das Substrat, welches die übrigen Komponenten trägt. Die Source- und Drain-Elektroden stehen im direkten Kontakt mit dem Halbleiter, während die Gate-Elektrode durch das Dielektrikum vom Halbleiter separiert ist. Durch die verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten entstehen sogenannte *Architekturen*, deren Benennung einfachheitsweise auf der Reihenfolge des Schichtaufbaus beruht, siehe Abbildung 2.2. Ist die Gate-Elektrode direkt auf dem Substrat aufgebracht, spricht man von einer bottom-gate Architektur. Im Gegensatz dazu steht die top-gate Architektur, bei der die Gate-Elektrode als letzte Schicht auf den Schichtstapel prozessiert wird. Die Source- und Drain-Elektroden, auch Kontakte (engl. *contact*) genannt, können entweder unter dem Halbleiter (bottom-contact) oder auf den Halbleiter (top-contact) aufgebracht werden. Aus der Anordnung der Elektroden im Schichtstapel ergibt sich die Gesamtbezeichnung der Architektur, wie *bottom-contact top-gate*. Alternativ existiert eine zweite Art der Benennung. Diese orientiert sich an der Anordnung der Kontakte zum Transistorkanal, welcher

¹ Für die Erläuterung von Fallenzuständen, siehe Abschnitt 2.1.2.

sich an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum befindet. Liegen sowohl Source und Drain als auch der Kanal in einer Ebene spricht man von einer *coplanaren* Architektur, andernfalls von einer *gestaffelten* (engl. staggered) Architektur. (Gomes, 2016)

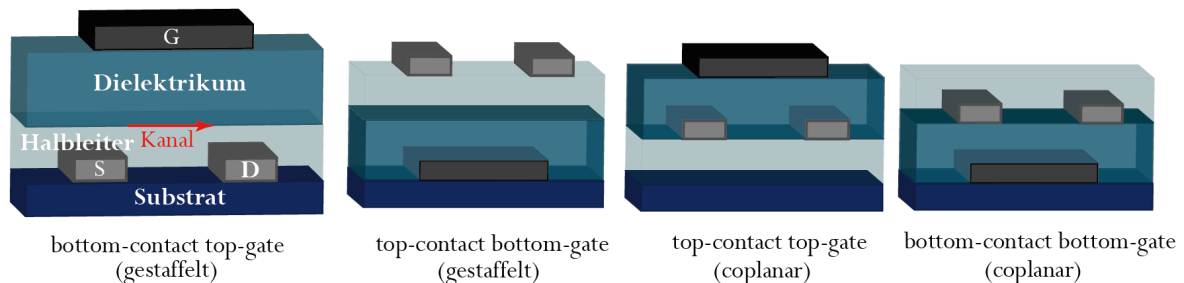


Abbildung 2.2: OFET-Architekturen. Nachgezeichnet nach Gomes (2016).

Der Abstand zwischen der Source- und der Drain-Elektrode wird als *Kanallänge* L bezeichnet, die Länge der Elektroden als *Kanalweite* W . Ein wichtiger Parameter zur Beschreibung von Transistoren ist das Verhältnis der beiden zueinander, das sogenannte *W-zu-L-Verhältnis* (Okamura, 2009).

2.1.1.3 Funktionsweise eines OFETs

Prinzipiell beruht die Funktion eines OFETs auf der Funktionsweise eines Dünnschichttransistors. Zwischen den drei Elektroden werden verschiedene Spannungen angelegt: die Gate-Source-Spannung V_{gs} zur Regulation der Ladungsdichte im Halbleiter und somit der Leitfähigkeit desselben sowie die Drain-Source-Spannung V_{ds} , die der Ladungsträgerinjektion und des Transports dient. Durch Anlegen besagter Spannung zwischen Source und Gate, werden Ladungen an der Grenzschicht zum Dielektrikum akkumuliert. Die angereicherten Ladungsträger bilden unter der zwischen Source und Drain entstehenden lateralen Potentialdifferenz den sogenannten *Kanal* aus. In Abbildung 2.2 ist ersichtlich, dass der Halbleiter und die Gate-Elektrode das Dielektrikum derart umschließen, dass der Kanal eine Gegenelektrode zu Gate bildet und ein Kondensator entsteht. Um diesen zu laden muss ein spezifischer Spannungsschwellenwert, die sogenannte *Schwellspannung* V_t (engl. threshold voltage), überschritten werden. Die Schwellspannung V_t wird den *Fallenzuständen* (engl. trap states, auch dt. Trap-Zustände), siehe Abschnitt 2.1.2, zugeschrieben. Diese kommen sowohl im Halbleiter-Bulk an sich als auch an der Grenzfläche zum Dielektrikum vor und müssen gefüllt werden, bevor effektiv ein Strom fließen kann. In einem idealen und von daher fallfreien OFET betrüge die Schwellspannung 0 Volt. Sie ist somit kein

intrinsischer Parameter eines OFETs. (Allard, 2008; Braga, 2009; Horowitz, 2009; Gomes, 2016; Pankalla, 2014)

Es wird zwischen drei Fällen unterschieden (Braga, 2009):

$V_{ds} < V_{gs} - V_t$ Die Ladungsträger werden an der Grenzfläche akkumuliert und der Drainstrom I_{ds} steigt linear mit V_{ds} (*linearer* oder *Ohm'scher* Bereich).

$V_{ds} \approx V_{gs} - V_t$ Nahe der Drain-Elektrode fällt das Potential auf null ab und der Kanal wird abgeschnürt. Der Drainstrom beginnt zu sättigen.

$V_{ds} > V_{gs} - V_t$ Die so geformte Verarmungsregion um Drain wird langsam größer. Der Drainstrom nimmt nicht mehr signifikant mit Erhöhung der Drainspannung zu (*Sättigungsbereich*).

OFETs werden durch ihre Strom-Spannungs-Kennlinien charakterisiert, siehe Abbildung 2.3. Diese sind die Ausgangskennlinie, bei welcher der Drain-Source-Strom als Funktion der Gate-Source-Spannung über die Drain-Source-Spannung geplottet wird, sowie die Transferkennlinie, bei welcher der Drain-Source-Strom als Funktion der Drain-Source-Spannung über die Gate-Source-Spannung geplottet wird.

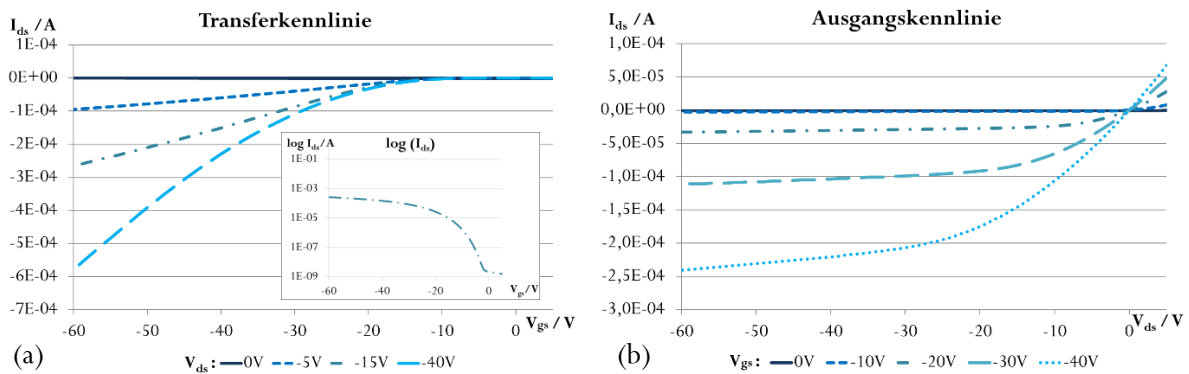


Abbildung 2.3: Transfer- (a) und Ausgangskennlinie (b) eines Transistors mit p-Halbleiter. Der Einschub zeigt die logarithmische Darstellung der -15 V-Transferkennlinie.

Der Drain-Source-Strom kann mit Hilfe mit der Kanalweite W , der Kanallänge L , der Kapazität des Gatekondensators C_i (berechnet aus der Schichtdicke des Dielektrikums und seiner Permittivität) und der Ladungsträgermobilität μ durch die folgenden zwei Gleichungen 2.2 und 2.3 beschrieben werden, jeweils geltend für den linearen Bereich und für den Sättigungsbereich (Pankalla, 2014).

$$I_{ds,lin} = \frac{W}{L} \cdot C_i \cdot \mu \left(V_{gs} - V_t - \frac{V_{ds}}{2} \right) \cdot V_{ds} \quad \text{für den linearen Bereich, } V_{ds} < V_{gs} - V_t \quad \text{Gleichung 2.2}$$

$$I_{ds,sat} = \frac{W}{2L} \cdot C_i \cdot \mu (V_{gs} - V_t)^2 \quad \text{für den Sättigungsbereich, } V_{ds} > V_{gs} - V_t \quad \text{Gleichung 2.3}$$

Abgesehen von μ und V_t sind alle Variablen bereits durch das Transistorsystem gegeben. Die Mobilität μ definiert sich über die Proportionalitätsbeziehung zwischen der Ladungsträgergeschwindigkeit v_{LT} und dem angelegten elektrischen Feld E nach:

$$\vec{v}_{LT} = \mu \cdot \vec{E} \quad \text{Gleichung 2.4}$$

Sie bestimmt somit die Geschwindigkeit mit der sich ein Ladungsträger in einem angelegten elektrischen Feld bewegen kann (Basu, 2007). Die Mobilität ist in organischen Halbleitern nicht konstant, sondern hängt von zahlreichen Faktoren, wie den molekularen Größen Packungsdichte, Ordnung, Molekulargewicht und Reinheit, ab, sowie von den äußeren Einflussfaktoren Temperatur, elektrisches Feld und Ladungsdichte (Coropceanu, 2007). Eine Erläuterung dieser Einflüsse folgt in den Abschnitten 2.1.2 und 2.3. Die beiden Unbekannten, Mobilität μ und Schwellspannung V_t , können sowohl aus dem Sättigungsbereich als auch aus dem linearen Bereich ermittelt werden. In einer Methode für Ermittlung aus dem Sättigungsbereich, wird die Quadratwurzel des Sättigungsstroms über die Gate-Spannung aufgetragen. Dies ist eine Umformung von Gleichung 2.3 (Braga, 2009). Die Mobilität erhält man aus der Steigung, die Schwellspannung aus der Verlängerung der Gerade bis zu $I_{ds,sat} = 0$. Da die Ladungsdichte in Sättigung jedoch nicht einheitlich über den Kanal verteilt ist, liefert diese Methode nur einen gemittelten Wert der verschiedenen auftretenden Mobilitäten. Eine alternative Methode wird in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Weitere Parameter zur Charakterisierung gedruckter Transistoren sind der *Off-Strom*, d.h. der Strom, der im ausgeschalteten Zustand ($V_{gs} = 0$) fließt, oft auch das Verhältnis von On- zu Off-Strom (engl. *on-off-ratio*), der *maximale Kanalstrom* I_{ds} , der *maximale Leckstrom* I_{Leck} bei einer gegebenen Spannung, der *Kontaktwiderstand* R_c (Gomes, 2016) und der *Subthreshold-Swing*. Letztere beschreibt das Verhalten des Transistors im Subthreshold-Bereich, d. h. für Spannungen unterhalb der Schwellspannung, in welchem der Drain-Strom exponentiell von der Gate-Source-Spannung abhängt. Aus der semilogarithmischen Darstellung erhält man eine Gerade. Die Steigung dieser Gerade ist der *Subthreshold-Slope*, die Reziproke des *Subthreshold-Swings*. Letzterer wiederum beschreibt die Potentialänderung am Gate, die eine Änderung des Drain-Stroms um eine Dekade verursacht (Stiftinger, 1994).

Obwohl sowohl OFETs als auch die Silizium-basierten MOSFETs zur Gruppe der Feldeffekttransistoren gehören, unterscheiden sich beide in drei Dingen (Gomes, 2016): Erstens arbeiten MOSFETs in Inversion, während OFETs stets in Akkumulation betrieben werden. Zweitens sind die organischen Halbleiter in OFETs meist undotiert, während Silizium stets dotiert vorliegt. Drittens besteht ein MOSFET fast vollständig aus Silizium (schwach dotiert, stärker dotiert, oxidiert), während im OFET verschiedene Materialien vorliegen. Letzteres führt zu höheren Defektdichten aufgrund der Schichtmorphologie an der Grenzschicht bzw. zu Anforderungen an die Kompatibilität der Materialien, um eine Übertragung von Ladungsträgern zu ermöglichen (Boer, 2005; Horowitz, 2004).

2.1.2 Ladungstransport in organischen Halbleitern

Die Güte der Funktion des Transistors beruht auf der Fähigkeit seiner Komponenten Ladungen transportieren zu können. In Abschnitt 2.1.1.1 wurden die Unterschiede zwischen anorganischen Halbleitern wie Silizium und organischen Halbleitern bereits herausgestellt. Auch der Transport der Ladungen basiert in organischen Halbleitern auf anderen Mechanismen.

In einem organischen Halbleiter wird der Ladungstransport bestimmt durch die Übertragung eines Ladungsträgers von einem Grenzorital eines Donorsegments in das entsprechende Grenzorital eines Akzeptorsegments. Im Falle von Elektronen handelt es sich bei den Grenzoritalen um LUMOs, im Falle von Löchern um HOMOs (Köhler, 2015). Die Segmentenergien basieren auf lokalisierten Zuständen und resultieren aus ganzen Molekülen oder einzelnen Abschnitten eines Moleküls, die durch eine Unterbrechung der Konjugation gebildet werden (Coropceanu, 2007). Durch die willkürliche Anordnung dieser konjugierten Abschnitte kommt es zu einer räumlichen Verteilung von *lokalisierten Zuständen* (engl. *localised state* oder *site*). Diese besitzen ein bestimmtes Volumen, in dem sich die Wellenfunktion eines Ladungsträgers ausbreiten kann (Oelerich, 2015; Oelerich, 2012). Allgemein liegen Ladungsträger in organischen Halbleitern in Form von Polaronen vor (Sirringhaus, 2007).

In organischen Halbleitern muss unterschieden werden, ob der Transport in kristallinen oder amorphen Schichten stattfindet. Je höher die molekulare Ordnung, desto ähnlicher wird der Transport dem klassischen Bandtransport (Horowitz, 2007, 2004). Kristallinität wird meist bei Halbleitern aus kleinen Molekülen beobachtet, die aufgedampft wurden. Im Gegensatz dazu liegen Polymere oft amorph vor. Die elektronische Struktur in in dieser Art ungeordneten Polymeren entsteht aus dem Zusammenspiel der Delokalisierung der π -Elektronen entlang des Polymerrückgrats, der starken Elektron-Phonon-

Kopplung sowie der energetischen und morphologischen Unordnung. Eine ausführlichere Erklärung des Begriffes der „Unordnung“ erfolgt in Abschnitt 2.3.1.1.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Vorhandensein von *Fallenzuständen*. Diese sind definiert als Zustände, die Ladungsträger in lokalisierten Zuständen halten, und somit zeitweise immobilisieren können (Gomes, 2016). Ein in einer Falle gefangener Ladungsträger nimmt somit nicht am Ladungstransport teil. Fallenzustände beeinflussen hierdurch die Performance eines OFETs in negativer Art und Weise. Dies zeigt sich durch Hysterese und vom Ideal abweichende Verläufe in den Kennlinien, Verschiebungen der Schwellspannung und Änderungen im Ladungstransport. Es wird unterschieden zwischen *seichten* und *tiefen* Fallenzuständen. Erstere sind definiert als Zustände, bei denen die Energie, die man zur Befreiung eines Ladungsträgers aus ihnen benötigt, in der Größenordnung von $k_B T$ ($0,025 \text{ eV}^2$ bei 298 K) liegt, letztere bei denen die Entleerungsenergie sehr viel größer $k_B T$ ist. Die Energie tiefer Fallen beläuft sich zwischen 0,5 und 0,8 eV. Aufgrund dieser hohen Energiebarriere kann das Entleeren von Fallenzuständen in organischen Halbleitern bis zu Tagen dauern. Die Entleerungsdauer ist jedoch sehr viel größer (mehrere Größenordnungen) als die Befüllungsdauer. Dies ist auf den großen Querschnitt des Zustands zurückzuführen. Ladungsträger können ihn leicht erreichen, bleiben in ihm aufgrund der energetischen Tiefe aber lange gefangen. In Siliziumhalbleitern liegen abweichende energetische Zustände vor: Die Fallenzustände sind wesentlich seichter und entleeren sich binnen Sekunden oder Millisekunden. Ein Fallenzustand von 0,1 eV wird in der Siliziumtechnologie als tief bezeichnet, während er in organischen Halbleitern als seicht gilt. (Gomes, 2016; Coropceanu, 2007)

Im Folgenden werden nun die Transportmechanismen für geordnete (bandähnlicher Transport) und ungeordnete Halbleiter (Hopping -Transport) vorgestellt.

2.1.2.1 Bandähnlicher Transport

Bei Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts können kristalline organische Halbleiter so hoch geordnet vorliegen, dass Bandtransport stattfindet. Dies konnte am Beispiel von Naphthalen gezeigt werden. Es ist jedoch anzumerken, dass die Entwicklung der Herstellungs- und Aufreinigungstechnik eines so reinen Kristalls mehr als ein Jahrzehnt in Anspruch genommen hatte (Köhler, 2015). Liegt der Halbleiter so hochgeordnet vor, schaffen es die bindenden π - und die antibindenden π^* -MO einen

² Berechnet aus den Naturkonstanten gegeben in *Atkins und de Paula* (2006).

bandähnlichen Zustand anzunehmen. Bei höheren Temperaturen versagt dieses Modell jedoch. Liegen Fallenzustände vor, lässt sich der Ladungstransport durch das Modell des *Multiplen Einfangens und Freilassen* (engl. *multiple trap and release*, kurz *MTR*) beschreiben. Es wird angenommen, dass sich die Energieniveaus in lokalisierte Zustände und sogenannte „mobile“, bandähnliche Zustände aufteilen, die durch die Mobilitätskante getrennt sind. Es ist anzumerken, dass „mobil“ hier im Sinne von „lässt Ladungsträgerbewegung zu“ und nicht im Sinne von „ist selbst mobil“ zu verstehen ist. Ladungsträger, die von den Metallkontakten injiziert wurden, füllen zunächst die lokalisierten Zustände, die sich in der Nähe der Bänder befinden. Durch thermische Aktivierung gehen sie in die mobilen bandähnlichen Zustände über und tragen dort zur Leitfähigkeit des Kanals bei. Während des Ladungstransports oberhalb der Mobilitätskante kommt es jedoch immer wieder zum Einfangen von Ladungsträgern in den nahegelegenen Fallenzuständen. Diese können die Ladungsträger nur durch die langsame thermische Aktivierung wieder verlassen. Die Übergänge aus den Fallenzuständen in die bandähnlichen Zustände bestimmen somit den Ladungstransport (Oelerich, 2015). Dieses Modell kann zwar sowohl die Gate-Spannungsabhängigkeit als auch die thermische Aktivierung der Mobilität erklären, versagt aber bezüglich der beobachteten Temperaturunabhängigkeit in bestimmten Kristallen, z.B. in Pentacen, und trifft keinerlei Annahme für die Transportmechanismen innerhalb des Bandes. (Horowitz, 2004; Basu, 2007; Coropceanu, 2007; Gershenson, 2006; Vissenberg, 1998)

2.1.2.2 Hopping-Transport

In amorphen Polymerhalbleitern findet der Ladungstransport in Form von Hopping (dt. Hüpfen) statt. Hopping ist definiert als thermisch aktiviertes Tunneln zwischen lokalisierten Zuständen (Vissenberg, 1998). Der Tunnelvorgang wird ermöglicht durch die Absorption oder Emission eines Phonons mit der entsprechend der Energiedifferenz der Zustände benötigten oder freiwerdenden Energie (Oelerich, 2015). Dabei tunnelt stets ein Ladungsträger von einem besetzten Zustand i in einen unbesetzten Zustand j . Die Raten, auch *Hopping-Raten* r_{ij} , für diesen Übergang können mit Hilfe des Modells nach *Miller-Abrahams* beschrieben werden (Oelerich, 2015):

$$r_{ij} = f_0 \cdot \exp\left[-\frac{2d_{ij}}{\alpha}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_i + |\varepsilon_j - \varepsilon_i|}{2k_B T}\right] \quad \text{Gleichung 2.5}$$

mit der „attempt-to-escape“-Frequenz f_0 , dem Abstand zwischen den beiden lokalisierten Zuständen d_{ij} , der Lokalisierungslänge α , den Zustandsenergien ε sowie der thermischen Energie, beschrieben durch

die Boltzmannkonstante k_B und der Temperatur T . Dieser Ansatz missachtet zwar Polaron-Effekte, ist aber der in der Literatur am häufigsten verwendete. Der Ansatz der *Marcus-Theorie*, welcher Polaron-Effekte berücksichtigt, sei hier zur Vollständigkeit erwähnt. Für eine tiefere Beschreibung sei an dieser Stelle auf Köhler und Bässler (2015) verwiesen. In ungeordnetem Material liegen die vorhandenen lokalisierten Zustände weder isoenergetisch noch in gleichen Abständen vor. Hieraus entsteht eine Asymmetrie der Hopping-Raten, welche den Ladungstransport verkompliziert. Er kann dadurch als eine willkürliche Wanderung durch zusammenhangsloses Hüpfen zwischen benachbarten Transportzuständen angesehen werden. Durch die vorliegende Asymmetrie ist es auch ersichtlich, dass die Aktivierungsenergien für das Hüpfen in die eine oder in die andere Richtung voneinander abweichen. Neben den Hopping-Raten $r_{i,j}$ ist die Beschreibung der Energieverteilung der lokalisierten Zustände in ungeordneten Materialien ein wichtiger Aspekt des Hopping-Transports. Hier bedient man sich des *Gauß'schen Unordnungsmodells*, auch bekannt als *Bässler Modell*. Diesem Modell liegt die Annahme zugrunde, dass sowohl die Energie als auch der Abstand der Segmente, zwischen denen die Ladungsträger hüpfen, gaußverteilt sind. (Köhler, 2015)

Einhin mit dem Hopping-Transport geht das *VRH-Modell* (kurz für engl. *variable-range hopping*), welches die temperaturabhängige Wahl der Hüpfdistanz beschreibt. Dies lässt sich einfach anhand von Gleichung 2.6, der auf dem Miller-Abrahams-Modell basierenden *Hopping-Schwierigkeit* $u_{i,j}$ erklären (Oelerich, 2015):

$$u_{i,j} = -\frac{2d_{ij}}{\alpha} - \frac{\varepsilon_j - \varepsilon_i + |\varepsilon_j - \varepsilon_i|}{2k_B T} \quad \text{Gleichung 2.6}$$

Die Hopping-Rate wird bestimmt durch diesen Zusammenhang zwischen energetischer (zweiter Summand in Gleichung 2.6) und räumlicher Verteilung (erster Summand in Gleichung 2.6) der lokalisierten Zustände. Die Wahl des Hopping-Pfades hängt somit von der Energie der erreichbaren lokalisierten Zustände, deren Verfügbarkeit sowie der Temperatur ab. Dies bedeutet, dass bei höheren Temperaturen hohe Energiedifferenzen zwischen zwei benachbarten Zuständen überwunden werden können, während bei niedrigen Temperaturen der Ladungsträger eine größere Distanz zurücklegen wird, um einen Übergang niedrigerer Energiedifferenz durchzuführen. Kurz gesagt, besagt das VRH Modell, dass ein Ladungsträger entweder eine kleine Distanz mit einer hohen Aktivierungsenergie oder eine lange Distanz mit geringer Aktivierungsenergie überwinden kann.

Vissenberg und Matters (1998) konnten eine arrheniusartige Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit beschreiben. Dies führen sie auf den exponentiellen Verlauf der DOS zurück, da in diesem Fall gezeigt werden konnte, dass das Hopping als Anheben eines Ladungsträgers vom Fermi-Niveau E_F

auf eine spezifische Transportenergie beschrieben werden kann. Des Weiteren konnte mit Hilfe der Perkolationstheorie und der Fermi-Dirac-Verteilung ein Ausdruck für die Leitfähigkeit gebildet werden, der den superlinearen Anstieg eben dieser mit der Ladungsträgerdichte zeigt. Durch das Befüllen der lokalisierten Zustände steigt die mittlere Energie des Systems, wodurch wiederum das Hüpfen in Zustände, die der Transportenergie entsprechen, gefördert wird. Auch die *Gate-Spannungsabhängigkeit* der Mobilität lässt sich mit Hilfe dieses Modells beschreiben. Sobald eine Gate-Spannung anliegt, werden zunächst die energetisch niedrigeren Zustände im Halbleiter von den an der Grenzschicht akkumulierten Ladungsträgern befüllt. Kommen nun weitere Ladungen hinzu, besetzen diese sofort die freien höher energetischen Zustände und benötigen dadurch geringere Aktivierungsenergien für das Hopping in einen benachbarten Zustand. Bei hohen Energien stehen im System mehr energetische Zustände zur Verfügung als bei niedrigen.

2.2 Druck- und Beschichtungsverfahren

Um die Schichtstapel der gedruckten Transistoren reproduzierbar aufzubauen, werden hoch technologisierte Verfahren benötigt. Neben teuren und aufwändigen Aufdampfverfahren, bestreitet das Prozessieren aus Flüssigphase einen wesentlichen Anteil. Das klassische Verfahren für den letztgenannten Prozess ist der Druck. *Drucken* ist definiert als (Ganz, 2016):

Die Reproduktion von Informationen in Form von Mustern durch Übertragung von Materie auf eine Oberfläche durch mechanische Kraft, hydrodynamischen Druck, elektrische Felder oder Strahlung.

Da Drucken als ein Hochdurchsatzverfahren mit hoher Reproduzierbarkeit gilt, ist es naheliegend das Aufbringen der organischen Materialien auf diese Weise vorzunehmen. Des Weiteren überzeugt die Drucktechnologie gegenüber den Beschichtungsverfahren, wie Schlitzgießen, durch seine Fähigkeit unregelmäßige und asymmetrische Muster zu erzeugen.

Doch wie wählt man das richtige Druckverfahren für organische Feldeffekttransistoren aus? In diese Wahl spielen fünf wesentliche Aspekte ein: die Kompatibilität des Verfahrens mit der Viskosität und Oberflächenspannung des Fluids, das erreichbare Übertragungsvolumen und somit die erreichbare Schichtdicke, die mögliche Auflösung des Druckbildes, die mögliche Übertragung von Fluid an nicht-druckenden Stellen und die Kompatibilität der Maschinenkomponenten mit den Lösemitteln des Fluids und der Reinigungsmittel.

Die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt. Für eine ausführliche Darstellung der Druckverfahren sei auf Ganz *et al.* (2016) und Kipphan (2001) verwiesen.

2.2.1 Tiefdruck

Der Tiefdruck hat ein breites Anwendungsspektrum in der graphischen Industrie. Vor allem gilt er aber als das Verfahren der Wahl, wenn die Frage nach hochauflösten Premiumprodukten in hohen Auflagen gestellt wird. Seinen Namen erhält der Tiefdruck aufgrund der Tatsache, dass das Druckbild in die Druckform eingraviert und somit vertieft zur Oberfläche vorliegt.

Die Druckwerke klassischer Tiefdruckmaschinen, siehe Abbildung 2.4, bestehen aus einer Farbwanne, in die der Tiefdruckzylinder eintaucht, dem Tiefdruckzylinder an sich und einem Gegendruckzylinder, oder auch Presseur, welcher das Substrat gegen die Druckform presst, siehe für diesen Abschnitt (Kipphan, 2001; GEF, 2003; Ganz, 2016). Der Tiefdruckzylinder stellt in diesem Verfahren die Druckform dar, d. h. er enthält die Information des zu übertragenden Musters, das Drucklayout. Das Drucklayout ist in Form von Nöpfchen in die äußere Kupferschicht des Zylinders graviert. Auf diese wird nach der Gravur eine schützende Chromschicht galvanisch aufgebracht. Die Gravur definiert sich in elektromechanisch gravierten Formen über folgende Parameter: die Lineatur (L/cm), den Rasterwinkel bezogen auf die Rotationsachse ($^{\circ}$) und den Stichelwinkel ($^{\circ}$). Ebenfalls gängige Gravurarten sind die Lasergravur und die Ätzgravur. Des Weiteren von Interesse ist die Flächendeckung. Dieser Begriff stammt aus der graphischen Industrie und besitzt verschiedene Abwandlungen seiner Definition. Eine gängige ist die folgende: Die Flächendeckung gibt ein bestimmtes Verhältnis von Nöpfchen zu Steg (überbleibendes Kupfer zwischen zwei Nöpfchen) an, das einen definierten Tonwert (angegeben in Prozent) im Druckbild erzeugt.

Folgt man dem Fluid auf seinem Weg von der Farbwanne durch das Druckwerk bis auf das Substrat, so durchläuft man sieben Schritte (Ganz, 2016). Vor Beginn des Druckens muss das Fluid bezüglich seiner Viskosität und Oberflächenspannung angepasst werden, man spricht von der *Konditionierung* (Schritt 0). Zunächst wird das Fluid in die Farbwanne eingefüllt oder in kleineren Maschinen mit einer Pipette aufgebracht und dem System somit zugänglich gemacht; die *Farbversorgung* hat stattgefunden (Schritt 1). Wenn die Rotation des Zylinders einsetzt, beginnen die Nöpfchen sich zu füllen und das Fluid zu transportieren. Eine definierte Menge Fluid steht dem System nun zur Verfügung, das Fluid ist *vordosiert* (Schritt 2). Die *Dosierung* (Schritt 3) erfolgt durch Abrakeln des überschüssigen Fluids: Das Ergebnis des Rakelprozesses ist eine sehr genau definierte Menge an Fluid, die sich in den gravierten Nöpfchen befindet. Durch mechanischen Kontakt des Substrats mit den befüllten Nöpfchen wird das Fluid auf dieses *transferiert* (Schritt 4). Löst sich die Druckform wieder vom Substrat, so verbleibt ein Teil des Fluids im Nöpfchen und ein Teil verbleibt auf dem Substrat. Es wird somit nicht das komplette dosierte Fluid übertragen, es findet Farbspaltung statt. Die entstehende Nassfilmdicke hängt

auf nicht saugfähigen Substraten von den durch die Druckform definierten Parametern Lineatur, Stichelwinkel und Flächendeckung ab, sowie von den Prozessparametern Druckgeschwindigkeit, Presseurdruck und dem Feststoffgehalt des Fluids. Das transferierte Fluid verweilt im Folgenden jedoch nicht in Ruhe. *Relaxation* findet statt (Schritt 5). Eine Vielzahl an hydrodynamischen Prozessen, wie der Ausgleich von Konzentrationsgradienten aufgrund von Verdunstung an den Rändern, findet in ihm statt und ändert seine Form. Im besten Fall verlaufen die abgesetzten Fluidtropfen zu einer homogenen Schicht. Der letzte Schritt (6) endet mit der schon während Schritt 5 beginnenden *Trocknung*. Das Lösemittel wird hierbei, meist unter Zusatz von thermischer Energie oder elektromagnetischer Strahlung, ausgetrieben. Im Falle von gelösten Stoffen, wie halbleitenden kleinen Molekülen, beginnt die Filmbildung hier durch Ausfällen aus Lösung, siehe auch Abschnitt 2.3.1.2. Im Fall von metallischen Dispersionen müssen im letzten Schritt oft organische Stabilisatoren entfernt werden, um einen direkten Kontakt der Metallpartikel untereinander erreichen können. Man spricht vom sogenannten *Curing*. Zur Erhöhung der Leitfähigkeit können Metallpartikel zusätzlich *gesintert* werden (Ranfald, 2015; Perelaer, 2010).

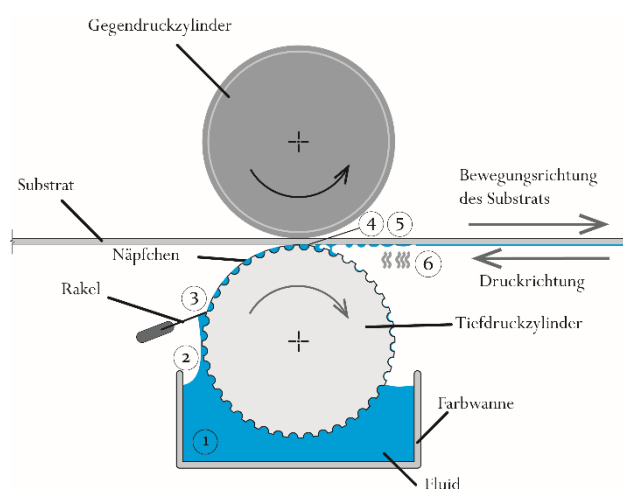


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Tiefdrucks. Übersetzt und nachgedruckt aus Nisato et al. (2016), S. 78. Mit freundlicher Genehmigung von Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.

Im funktionalen Druck überzeugt der Tiefdruck an mehreren Stellen: Zum einen können niedrigviskose Fluide (< 30 mPas) problemlos prozessiert werden. Zum anderen ist die Chromoberfläche des Zylinders inert gegenüber organischen und vor allem aromatischen Lösemitteln. Durch die einfache Farbspaltung kann mehr Fluid übertragen werden als beispielsweise im Flexodruck, siehe Abschnitt 2.2.2. Auch die Verweildauer des Fluids im Druckwerk ist dadurch sehr gering, was von Vorteil bei der Prozessierung von Niedrigsiedern mit hohem Dampfdruck ist. Ebenfalls vorteilig ist die hohe Auflösung, die im

Tiefdruck erreicht werden kann. Es wurden bereits gedruckte Silberlinien mit einer Breite $< 5 \mu\text{m}$ publiziert, die aus Nöpfchen mit einem Volumen im Bereich von Attolitern gedruckt wurden (Kang, 2014; Grau, 2016).

2.2.2 Flexodruck

Eine Alternative zum Tiefdruck für die Prozessierung niedrigviskoser Fluide ist der Flexodruck. Dieser ist, im Gegensatz zum gerade beschriebenen Tiefdruck, ein Hochdruckverfahren, d.h. die druckenden Stellen sind erhaben gegenüber der Oberfläche. Hieraus ergibt sich einer seiner wichtigsten Vorteile: Durch das Hervorstehen der druckenden Elemente kann auch nur Fluid an den Stellen übertragen werden, an denen dies vorgesehen ist. Dies spielt vor allem beim Drucken von Leiterbahnen eine Rolle. Werden zwischen zwei Elektroden fälschlicherweise leitende Partikel übertragen, so wie es im Tiefdruck stellenweise vorkommt, kann dies zum Kurzschluss führen. Im Alltag ist der Flexodruck hauptsächlich aus dem Verpackungsdruck bekannt.

Herkömmliche Flexodruckmaschinen, siehe Abbildung 2.5, bestehen aus einem Farbwerk, welches die Kammerrakel und die Rasterwalze enthält, und einem Druckwerk, welches Klischeezylinder und Gegendruckzylinder enthält, siehe für diesen Abschnitt (Kipphan, 2001; Dykes, 1999; Ganz, 2016).

Auch im Flexodruck muss das Fluid zunächst *konditioniert* werden (Schritt 0). Die *Farbversorgung* (Schritt 1) erfolgt in Form einer Kammerrakel oder in Labordruckmaschinen mit Hilfe von Pipetten. Die *Vordosierung* (Schritt 2) erfolgt durch Abrakeln der Rasterwalze. Die Rasterwalze besitzt meist eine vollflächig gravierte Keramikoberfläche und dient der Bereitstellung eines definierten Fluidvolumens an die Druckform. Ihre wichtigste Kenngröße ist von daher das Fluidvolumen, das sie transportieren kann, auch *Schöpfvolumen* S_v genannt, angegeben in mL/m^2 . Im nächsten Schritt wird das transportierte Fluid von der Rasterwalze auf die erhabenen Stellen der Druckform übertragen. Die Menge an Fluid, die übertragen werden kann, ist nun *dosiert* (Schritt 3). Die Druckform führt das Fluid mit sich bis es zum Kontakt mit dem Substrat kommt und das Fluid transferiert wird (Schritt 4). Bis hierhin hat somit zweimal Farbspaltung stattgefunden. Es folgen, analog zum Tiefdruck, die Relaxation und Trocknung des Fluids (Schritte 5 und 6).

Flexodruckformen, auch Klischees genannt, bestehen im Allgemeinen aus Photopolymeren oder Gummi. Beide Materialien sind nicht beständig gegenüber einer Vielzahl von Lösemitteln (vor allem Aromaten und Alkane), die in der gedruckten Elektronik eingesetzt werden. Die Druckformen quellen durch den Kontakt mit diesen Lösemitteln, was zu einer Verzerrung des Druckbildes führen kann. Durch die gleichzeitig auftretende hohe mechanische Belastung während des Druckens können sie außerdem

irreversibel zerstört werden (Theopold, 2014). Ein weiterer Aspekt der Unbeständigkeit ist das Herauslösen von Substanzen aus der Druckform während des Druckens, die sich in der erzeugten Schicht niederschlagen. Dies konnte an Halbleiterschichten gezeigt werden (Trollmann, 2014). Seit mehreren Jahren werden nun Fluorkautschuke eingesetzt, die eine hohe Beständigkeit gegenüber Aromaten, jedoch auch andere Benetzungseigenschaften aufweisen.

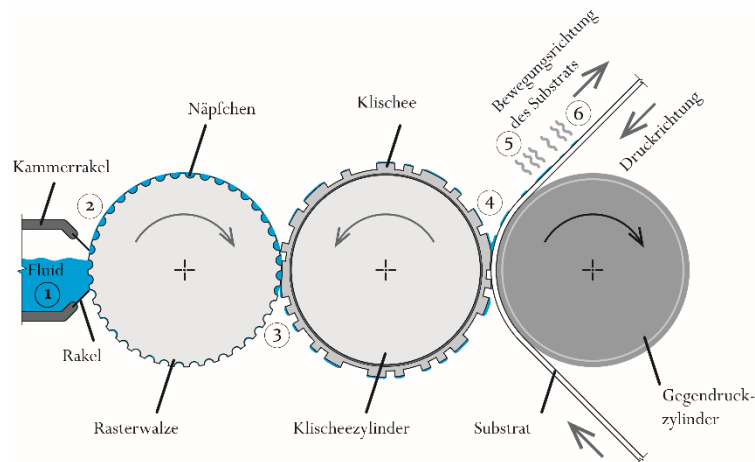


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung Flexodruck. Übersetzt und nachgedruckt aus Nisato et al. (2016), S. 78. Mit freundlicher Genehmigung von Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.

2.2.3 Spin-Coating

Das Spin-Coating, oder auch die Rotationsbeschichtung, ist ein wichtiger Referenzprozess in der Prozessierung funktioneller Materialien aus der Flüssigphase, siehe für diesen Abschnitt (Ganz, 2016; Stillwagon, 1992). Fluide, die für den Tief- oder Flexodruck angepasst wurden, können ohne weitere Modifikationen in diesem Verfahren eingesetzt werden. Es zeugt von hoher Reproduzierbarkeit und einfachster Handhabung bei gleichzeitiger Erzeugung flächig homogener Schichten. Im Spin-Coating wird ein Fluid zunächst zentriert auf das Substrat aufgebracht. Das Fluid wird nun durch die aus der Rotation des Substrats (100-5000 rpm) resultierenden Zentrifugalkraft homogen auf der Probe verteilt. Ein Großteil des Fluids wird dabei vom Substrat heruntergeschleudert. Ein Teil bleibt aufgrund der viskosen Reibung zurück. Bei ausreichender Benetzung entsteht aus dem so erzeugten Nassfilm eine Schicht. Bezüglich der resultierenden Schichtdicke, unterscheidet man zwischen zwei Fluidsystemen: die einen, die während des Spin-Coatings bereits trocknen, und die anderen, deren Trocknung erst nach Beendigung der Rotation einsetzen. Bei letzterem verhält sich die Nassfilmdicke proportional zu $1/v_{rot}$,

siehe Gleichung 2.7 (a), bei ersterem zu $\sqrt{1/v_{rot}}$, siehe Gleichung 2.7 (b), wobei v_{rot} die Rotationsgeschwindigkeit gegeben in rpm ist (Ganz, 2016):

$$h \propto \frac{60}{2\pi \cdot v_{rot}} \sqrt{\frac{3\eta}{2\rho \cdot t}} \quad \text{bzw.} \quad h \propto \sqrt{\frac{60}{2\pi \cdot v_{rot}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{3k\eta}{2\rho}} \quad \text{Gleichung 2.7 (a) bzw. (b)}$$

mit der Viskosität η , der Dichte ρ , der Dauer der Rotation t und einer fluidspezifischen Konstante k .

2.3 Gedruckte bottom-contact top-gate OFETs

Aus Flüssigphase prozessierte OFETs zeigen im Vergleich zu aus der Gasphase hergestellten organischen Transistoren oder gar zu den Silizium-basierten MOSFETs größere Abweichungen in den extrahierten Parametern. Dies ist auf die präziseren Fertigungstechnologien der Siliziumtechnologie bzw. der Gasphasenabscheidung zurückzuführen. Die Ursachen für Schwankungen in der Performance, welche in diesem Abschnitt vorgestellt werden, liegen in der *Schichtmorphologie* und Homogenität des Halbleiters sowie allgemein in der *Güte der Grenzfläche* zwischen Halbleiter und Dielektrikum, in den *Schichtdickenabhängigkeiten* des Halbleiters und des Dielektrikums, in *Abweichungen bezüglich der Transistordimensionen*, die auf den Druckprozess zurückzuführen sind, und in *Verunreinigungen*, welche Fallenzuständen induzieren können (Gomes, 2016). Diese Parameter werden beeinflusst durch simple Versuchsparameter wie die Temperatur und Luftfeuchte oder den Prozessbedingungen wie der Verdunstungsrate des Lösemittels (Basu, 2007). An Pentacen, einem Small-Molecule-Halbleiter, konnten so hohe Abweichungen in der Mobilität (6 Größenordnungen) gefunden werden, dass sogar die Vergleichbarkeit von Ergebnissen verschiedener Forschungsgruppen in Frage gestellt wurde (Sirringhaus, 2007; Coropceanu, 2007). Amorphe Halbleiter bilden im Vergleich reproduzierbarere und gleichmäßigere Schichten aus, da Herausforderungen, die durch die Phasengröße oder den Korngrenzen entstehen, von vornherein eliminiert sind (Gau, 2016).

2.3.1 Schichtmorphologie und ideale Grenzfläche

In organischen Feldeffekttransistoren findet der Ladungstransport nur in den ersten Monolagen an der Grenzschicht zwischen Halbleiter und Dielektrikum statt (Dodabalapur, 1995; Gomes, 2016). Daher ist es essentiell, dass diese Grenzschicht morphologisch und dadurch auch energetisch eine hohe Güte aufweist. Das Optimieren dieser Grenzschicht zur Verbesserung der OFET-Performance, das sogenannte *Interface-Engineering*, ist zum festen Bestandteil der OFET-Forschung geworden (Choi, 2014; Park, 2007;

Facchetti, 2007). Da die Morphologie des Bulks ebenfalls die des Halbleiters an der Grenzschicht beeinflusst und Ladungsträger ein Stück weit durch den Bulk transportiert werden müssen, bevor sie die Grenzschicht erreichen, ist die Morphologie der Schicht ebenfalls von Bedeutung. Sowohl die Morphologie als auch die Güte der Grenzschicht werden beeinflusst von der *Unordnung im Material*, die durch die Filmbildung entsteht, den *Welligkeiten und Rauigkeiten*, die auf den Beschichtungsprozess zurückzuführen sind und derer, die aufgrund der Mehrfachbeschichtung, z.B. durch den Einsatz nicht perfekt *orthogonaler Lösemittel*, entstehen. Der Ursprung und die Bedeutung dieser Größen werden im Folgenden erläutert.

2.3.1.1 Molekulare und energetische Unordnung

In jeder flüssigprozessierten Schicht ist Unordnung vorhanden. Diese verursacht energetische Inhomogenität innerhalb der Halbleiterschicht (Sirringhaus, 2007). Man unterscheidet zwischen *diagonaler* und *nicht-diagonaler Unordnung*. Diese Begriffe sind auf die Notation des Hamilton-Operators in Matrixschreibweise zurückzuführen. Bei diagonaler Unordnung erscheinen die Energien der lokalisierten Zustände in der Diagonalen des Hamilton-Operators in Matrixschreibweise (Köhler, 2015). Die *diagonale Unordnung* beschreibt die Schwankungen der Zustandsenergien innerhalb eines Materials, d.h. innerhalb eines Moleküls oder eines Kettensegments. *Nicht-Diagonale Unordnung* hingegen beschreibt die Schwankungen, die auf die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Molekülen oder Kettensegmenten zurückzuführen sind. Es werden somit Unregelmäßigkeiten bezüglich Position und Orientierung beschrieben. Doch wie entstehen diese Segmente im Halbleiter überhaupt? Polymere, oder alle längerkettigen Moleküle, besitzen die Fähigkeit sich entlang einzelner Bindungen zu drehen. Durch diese Drehungen können, beispielsweise sich abstoßende Gruppen, sich weitmöglich voneinander entfernen. Dies wird ausgedrückt durch den *Konformationsfreiheitsgrad*. Durch diese Verdrillung der Polymerketten kommt es zur Bildung von Segmenten, die in einem bestimmten Winkel zueinander stehen. Diese Segmente sind unterschiedlich lang und weisen dadurch unterschiedliche HOMO- und LUMO-Energien auf. Sie besitzen eine begrenzte Konjugationslänge (Sirringhaus, 2007). Durch nicht-diagonale Unordnung entstehen elektronische Kopplungen, die Leitungspfade durch den Halbleiter generieren, welche an Drain enden oder ein totes Ende bilden können (Coropceanu, 2007).

Diese konformativen Abweichungen sowie die örtliche Verteilung von Dipolmomenten, entstehend durch benachbarte polare Gruppen aus dem eigenen Rückgrat oder dem Dielektrikum, sorgen für eine Verbreiterung der DOS (Sirringhaus, 2007). Ladungsträger können in ungeordneten Materialien durch Bildung lokalisierter Polaronen ihre Energie verringern. Diese lokalisierten Zustände

sind von einem molekular verzerrten Bereich umgeben. Die Energieerniedrigung durch Polaronbildung ist ein Produkt der durch Unordnung verringerten Konjugationslänge und der starken Elektron-Phonon-Kopplung.

2.3.1.2 Welligkeit und Rauigkeit

Aufgrund der Abscheidung aus Flüssigphase generell (Gomes, 2016) sowie durch den Druckprozess im Speziellen, kommt es zur Ausbildung von Welligkeiten und Rauigkeiten in den entstehenden Schichten, siehe Abbildung 2.6. Per Definition unterscheiden sich beide Störungen in ihrer Wellenlänge. Diese liegt im Submikrometerbereich für die Rauigkeit und im Millimeterbereich für die Welligkeit (Tone, 2016). Zwei Aspekte spielen bei diesem Prozess eine entscheidende Rolle: Zum einen die Benetzung des Fluids auf dem Substrat und zum anderen der Mechanismus des Phasenübergangs von der Lösung zur festen Schicht, welcher begleitet wird von den fluiddynamischen Prozessen zum Ausgleich von Oberflächenspannungs- und Konzentrationsgradienten.

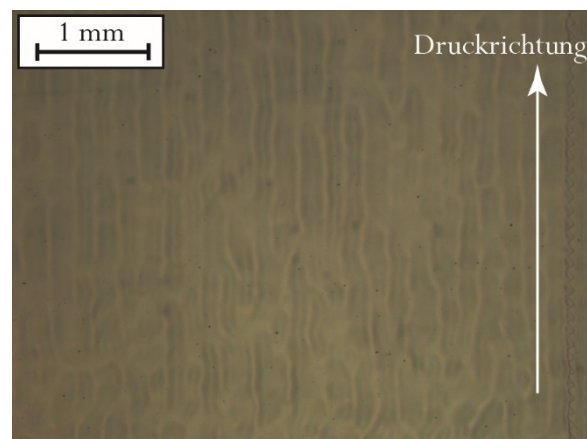


Abbildung 2.6: Welligkeiten mit Wellenkämmen entlang der Druckrichtung in einem mehrschichtigen Druck eines Polymers. Zwischen hohen und tiefen Stellen kann die Schichtdickendifferenz in diesem Fall fast 1 μm betragen.

Das Benetzungsverhalten eines Fluids auf einem Substrat kann beschrieben werden durch die Grenzflächenenergien σ derselbigen. Diese stehen über den *Benetzungsparameter* S (Ganz, 2016) im Zusammenhang:

$$S = \sigma_{SG} - \sigma_{SL} - \sigma_{LG} \quad \text{Gleichung 2.8}$$

ausgedrückt durch der Oberflächenenergie der jeweiligen Grenzflächen fest-gasförmig (engl. solid-gas, kurz SG), fest-flüssig (engl. solid-liquid, kurz SL) und flüssig-gasförmig (engl. solid-gas, kurz LG). Ist

$S > 0$ so spricht man von perfekter Benetzung. Eine Faustregel besagt, dass Benetzung stattfindet, wenn die Oberflächenspannung des Substrats um mindesten 15 mN/m größer ist als die des Fluids bzw. der Kontaktwinkel des Fluids auf dem Substrat kleiner 15° ist (Kim, 2016). Trifft dies nicht zu, kann es stellenweise oder großflächig zu Entnetzung kommen. Das Fluid zieht sich von den entsprechenden Stellen zurück und das Material wird hierdurch inhomogen auf dem Substrat verteilt. Im Fall der Entnetzung kommt es oft zu Performanceausfällen der Schicht, siehe Abbildung 2.7.

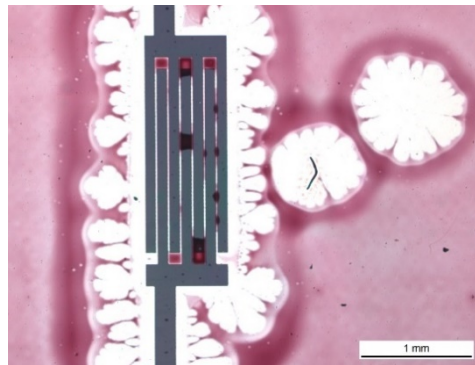


Abbildung 2.7: Entnetzung eines P3HT-Derivats auf einem mit Silberelektroden beschichteten PET-Substrat, siehe Abschnitt 4.1. Es findet zum einen Entnetzung aufgrund der abweichenden Oberflächenenergie an den mit 1-Hexadecanthiol beschichteten Silberelektroden statt und zum anderen aufgrund einer äußeren Verunreinigung (Fussel). Aufgrund ersteren Effekts ist kaum Halbleiter zwischen den Elektroden vorhanden. Der Transistor zeigt keine charakteristische Performance.

Bezüglich des Mechanismus des Phasenübergangs muss zwischen Polymerlösungen und Lösungen kleiner Moleküle unterschieden werden (Ganz, 2016). In Polymerlösungen findet beim Ausfällen ein Phasenübergang zweiter Ordnung statt. Durch die Verringerung des Lösemittelanteils geliert das Polymer schrittweise. Anschließend wird das Lösemittel aus dem Gelnetzwerk ausgetrieben. Bei kleinen Molekülen findet ein Phasenübergang erster Ordnung statt. Das Lösemittel wird so lange im Fluid reduziert, bis die Löslichkeitsgrenze des Materials erreicht ist. Durch Nukleation beginnt das Material sich zu verfestigen, es kristallisiert aus. Es wird unterschieden zwischen homogener und heterogener Nukleation, wobei erstere aufgrund Clusterbildung eigener Moleküle entsteht und letztere durch Fremdkörper (Weidinger, 2003). Je nach Güte des Phasenübergangs entstehen mehr oder weniger raue Schichten.

Ein wichtiger Aspekt bei der Prozessierung mittels Drucktechnologien ist die Homogenisierung flüssiger Schichten, das sogenannte *Leveling*, durch Kapillarkräfte und Diffusion. Im Allgemeinen dominieren allerdings erstere. Im Druckprozess entstehen periodische Welligkeiten durch die Druckform an sich, oder durch hydrodynamische Instabilitäten, die beim Ablösen der Druckform vom

Substrat entstehen, z.B. das Phänomen *Viscous Fingering*. Diese Welligkeiten werden, bei ausreichender Zeit, vom Fluid ausgeglichen. Während eine hohe Oberflächenspannung sich hier verkürzend auf die Levelingzeit auswirkt, wirkt die Viskosität im Fluidinneren diesem entgegen. Die Zeit, welche die Schicht zum Ausgleichen der Welligkeiten benötigt, wird *Leveling-Zeit* τ_{λ}^{rel} genannt und kann durch folgenden Ausdruck beschrieben werden (Hernandez-Sosa, 2013):

$$\tau_{\lambda}^{rel} = \frac{3 \cdot \eta \cdot \lambda^4}{16 \cdot \pi^4 \cdot \sigma \cdot h_0^3} \quad \text{Gleichung 2.9}$$

mit der Viskosität η , der Wellenlänge der Störung λ , der Oberflächenspannung σ und der Grundhöhe der Schicht unter der halben Amplitude der Welligkeiten h_0 . Aus Gleichung 2.9 ist ersichtlich, dass die Leveling-Zeit neben den Eigenschaften des Fluids auch von der Schichtdicke und der Wellenlänge der Störung abhängt. Somit leveln dicke Schichten mit kurzwelligen Störungen besser aus als sehr dünne Schichten mit langwelligen Störungen. Im Idealfall ist das Leveling abgeschlossen, bevor die Trocknung eine erhebliche Abnahme der Schichtdicke verursacht hat. Durch die niedrigen Feststoffgehalte der Fluide in der gedruckten Elektronik liegt der Schichtdickenunterschied zwischen Nass- und Trockenfilm in der Größenordnung von Faktor 10-100, d.h. aus mehreren Mikrometern Nassfilm werden mehrere zehn bis wenige hundert Nanometer Trockenfilm. Die Homogenisierung der Schicht hängt somit auch von den Trocknungsbedingungen, der Verdunstungsrate und dem Dampfdruck des Fluids ab.

Welligkeiten in den gedruckten Schichten können vor allem auch durch die Druckform der Schicht aufgeprägt werden, siehe Abschnitt 2.2. Im Tiefdruckt ergeben diese sich aus der Anordnung der Nöpfchen. Des Weiteren wird den Polymeren eine Vorzugsrichtung der Orientierung im Druck vorgegeben. Dies wurde bereits von *Kushida et al.* (Kushida, 2014) für den Halbleiter Poly(5,5'-bis(3-dodecyl-2-thienyl)-2,2'-bithiophen) in einem Rollendruckverfahren untersucht. Er fand einen optimalen Ausrichtungswinkel des Kanals zur Druckrichtung von 30° . Die niedrigsten Mobilitäten erhielten sie für einen Ausrichtung von 90° . Diese Beobachtung konnte von *Vilkmann et al.* (Vilkmann, 2015) für den Halbleiter GRAPE114 der Fa. BASF AG im Tiefdruck bestätigt werden. Sie konnten zeigen wie sich Halbleiterkristalle in Form der einzeln abgesetzten Nöpfchen ausbilden.

2.3.1.3 Orthogonalität der Lösemittel

Bei Verwendung einer top-gate Architektur, siehe Abschnitt 2.1.1.2, wird das Dielektrikum im zweiten Schritt auf den Halbleiter aufgebracht. Durch das im Dielektrikum-Fluid vorhandene Lösemittel kann es

zum Quellen, d.h. zur Aufnahme von Lösemittelmolekülen in die Halbleiterschicht, oder gar zum Anlösen der Schicht kommen. Die beiden Schichten können sich hierdurch durchmischen und die Grenzfläche kann sich aufrauen und vergrößern. Es existieren zwei Möglichkeiten zur Vermeidung dieses Problems: Zum einen die Verwendung orthogonaler Lösemittel, d.h. dass das Lösemittel des Dielektrikums den Halbleiter nicht zu lösen vermag, und zum anderen die Verwendung quervernetzender Halbleitermaterialien, die durch einen Nachbehandlungsschritt vor der Aufbringung des Dielektrikums unlöslich gemacht (Sirringhaus, 2007; Panzer, 2007).

2.3.2 Schichtdickenabhängigkeit des Halbleiters

Die Schichtdicke des Halbleiters ist ein entscheidender Einflussfaktor für die Performance eines organischen Feldeffekttransistors (Verilhac, 2009). Je nach Architektur des Transistors sind verschiedene Einflüsse in der Literatur bereits untersucht und diskutiert worden (Gburek, 2010). Im Rahmen dieser Arbeit sind die Einflüsse auf *staggered* Architekturen, d.h. auf Architekturen bei denen die Source-Drain-Elektroden durch den Bulkhalbleiter vom Kanal getrennt sind, von besonderem Interesse. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass die an Source injizierten Ladungsträger zunächst den Bulkhalbleiter passieren müssen, bevor sie den Kanal erreichen. Man unterscheidet zwei Abhängigkeitsbereiche: Im gerade benannten Bereich hoher Schichtdicken, d.h. Schichtdicken die höher sind als die der Source-Drain-Elektroden, ist der Ladungsträgertransport Diffusionslimitiert durch den Transport durch den Bulk. Im Bereich niedriger Schichtdicken, d.h. Schichtdicken, die geringer sind als die der Source-Drain-Elektroden, wird der Transport bestimmt durch den Belegungsgrad der Elektroden mit der sehr dünnen Halbleiterschicht. Hinzu kommt eine erhöhte Fallendichte nahe der Elektroden, da es an der Grenzfläche Metall-Halbleiter zu Filmbildungsdefekten kommt (Verilhac, 2009). Eine Zunahme der Mobilität mit zunehmender Schichtdicke wurde beispielsweise bei Transistoren der Halbleiter PIF8-TAA (Pankalla, 2012a), P3HT (Gburek, 2010; Sandberg, 2002; Wang, 2004) und Pentacene (Xu, 2008) (Ruiz, 2005) beobachtet. Allerdings wurde bei Pankalla *et al.* ein Substrat verwendet, welches einen Haftvermittler von 50 nm Dicke für unter den Elektroden enthielt. Dies führte dazu, dass diese Höhe erst einmal überwunden werden musste um eine Injektion von der eigentlichen Elektrode aus ermöglichen. Die Mobilitäten von P3HT und Pentacene nähern sich mit ansteigender Schichtdicke einem Grenzwert. Es wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der Schichtdicke dabei hilft, Defekte in der ersten Monolage der Grenzschicht zu umgehen. Liegt beispielsweise eine Korngrenze vor, so können Ladungsträger einen energetisch günstigeren Pfad entlang der zweiten und dritten Lage passieren. Dieser Effekt wirkt bis zu einer bestimmten Schichtdicke, danach führt eine weitere Erhöhung der Schichtdicke

nicht mehr zu einer Erhöhung der Mobilität (Gburek, 2010; Sandberg, 2002). Die Schichtdickenabhängigkeit ist jedoch nicht eindeutig. Für TIPS-Pentacene (Boudinet, 2010) wurde z.B. eine Abnahme der Mobilität mit der Schichtdicke festgestellt, für Kupfer-Phthaloyanin (CuPc) liegt ein Mobilitätsoptimum bei 30 nm vor. Ein Optimum haben auch *Grau und Subramanian* (2016) für den Halbleiter *lisicon*® SP400³ festgestellt. In ihrer Untersuchung der Abhängigkeit der Mobilität von der Viskosität⁴ des SP400-Fluids haben sie die höchsten Mobilitäten ($\sim 0,4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) für eine Schicht mit einer schwankenden Dicke zwischen 10 und 30 nm (abgelesen aus Figure 3(b)) ermittelt. Für höhere und niedrigere Schichten sinkt die Mobilität. *Verilhac et al.* (2009) schließen aus ihren Messungen an PTAA und Poly[9,9-dioctyl-fluoren-co-N-(4-butylphenyl)-diphenylamin] (TFB), dass die wesentlich von der Schichtdicke des Halbleiters beeinflussten Kennwerte des OFETs die Schwellspannung und der Subthreshold-Slope sind, siehe auch Abschnitt 2.1.1.3. Es ist anzumerken, dass eine Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes von der Schichtdicke existiert. Im Allgemeinen liegt mit zunehmender Schichtdicke auch ein Zunahme des Kontaktwiderstandes vor (Boudinet, 2010; Verilhac, 2009; Pankalla, 2012a). *Kano et al.* (2011) zeigen anhand von Dibutylquaterthiophen-Transistoren (4QT4), dass zusätzlich eine Einschränkung für den Gate-Spannungsbereich gilt: Bei niedrigen Gate-Spannungen nimmt der Kontaktwiderstand mit zunehmender Schichtdicke des Halbleiters ab, bei hohen Gate-Spannungen zu. Die Gruppe um *Kano* erklärt dies über freie Ladungsträger, die sich im Halbleiter befinden. Sie gelangen womöglich über Verunreinigungen in den Halbleiter. Bei niedrigen Gate-Spannung nimmt die Anzahl der freien Ladungsträger mit zunehmender Schichtdicke zu und der Kontaktwiderstand sinkt. Bei hohen Gate-Spannungen hingegen werden die Ladungsträger am Kanal akkumuliert und die Konzentration freier Ladungsträger im Halbleiter sinkt. Hierdurch gewinnen die Fallenzustände an Einfluss in der Injektionszone und der Kontaktwiderstand nimmt zu.

2.3.3 Schichtdickenabhängigkeit des Dielektrikums

Neben der Wahl des organischen Halbleiters ist es ebenso wichtig, ein passendes Dielektrikum für den Aufbau organischer Feldeffekttransistoren zu finden. Siliziumdioxid, wie es in klassischen MOSFETs verwendet wird, erfüllt nicht die in der gedruckten Elektronik geforderten Eigenschaften. Neue Materialklassen mussten somit auf ihre Verwendbarkeit in organischen Transistoren geprüft werden. Zu den Anforderungen, auf die die Materialien hin getestet wurden, gehörten die mechanische Flexibilität,

³ Chemische Struktur unbekannt.

⁴ Die Viskosität wurde über den Lösemittelanteil im Fluid eingestellt. Hieraus resultieren verschiedene Feststoffanteile, die sich direkt in der Schichtdicke niederschlagen.

die Möglichkeit aus Flüssigphase prozessiert werden zu können sowie den Transistor bei niedrigen Spannungen betreiben zu können. Drei Materialklassen haben sich herauskristallisiert: organische Polymere (z.B. PVA mit $\epsilon_r=10$), high-k anorganische Oxide (z.B. TiO_2 mit $\epsilon_r=41$) und selbstorganisierende kleine Moleküle (z.B. Octadecyltrichlorosilan). Für flüssigprozessierte Schichten ist außerdem die kritische Schichtdicke wichtig, ab der eine pinhole-freie Schicht erzeugt werden kann. Zum einen muss die Schicht dick genug und fehlerfrei sein um niedrige Leckströme zu erreichen und Durchschläge gar zu eliminieren und zum anderen muss die Schicht sehr dünn sein, da sich aus ihr mit der dielektrischen Konstante ϵ_r die Gate-Kapazität im Transistor ergibt. Die chemische Reinheit und Beschaffenheit des dielektrischen Materials beeinflussen außerdem den Ladungstransport an der Grenzfläche zum Halbleiter. So konnte an PTAA-Transistoren gezeigt werden, dass ungleichmäßig verteilte polare Gruppen an der Grenzfläche des Dielektrikums die energetische Unordnung erhöht und somit zu einer Verringerung der Mobilität geführt haben. (Facchetti, 2005; Sirringhaus, 2007)

2.3.4 Abweichungen in den Transistordimensionen durch Druckfehler

Durch Fehler im Druckbild kann es zu Abweichungen in den Transistordimensionen kommen. Dies ist auf nicht optimal bis gar nicht regulierte Prozesse zurückzuführen (Gomes, 2016). Beim Drucken der Source-Drain-Elektroden, kann das verwendete Fluid vor der Trocknung verlaufen. Der Abstand zwischen beiden Elektroden, d.h. der Transistorkanal, wird dadurch kleiner, siehe Abbildung 2.8 (a) rechter Elektrodenzwischenraum. Der Soll- und Ist-Zustand der Linienbreite weichen voneinander ab. Außerdem kann es durch nicht vollständige Übertragung des Druckbildes zu Unterbrechungen in den Elektroden kommen. Besteht kein elektrischer Kontakt mehr zu bestimmten Abschnitten der Elektroden, wird die Kanalweite um diese verkürzt, siehe Abbildung 2.8 (b). Abbildung 2.8 (c) zeigt gleich zwei Störungen, die das Transistorverhalten beeinflussen: Zum einen sind Ausfransungen an den Elektroden zu erkennen, die lateral in den Kanal hineinragen und zu Kurzschlüssen führen können und zum anderen hat sich an der dritten Struktur von links das Fluid zurückgezogen. Die Kanallänge ist an dieser Stelle größer als gewünscht. Des Weiteren kann es vorkommen, dass durch fehlerhaft angelegte Layouts oder durch ein Zurückziehen des Fluids auf dem Substrat nicht der vollständige Kanal mit dem Halbleiter bedeckt ist. Dies kann sich in Form eines verringerten W-zu-L-Verhältnisses bis hin zum Ausfall des Transistors bemerkbar machen.

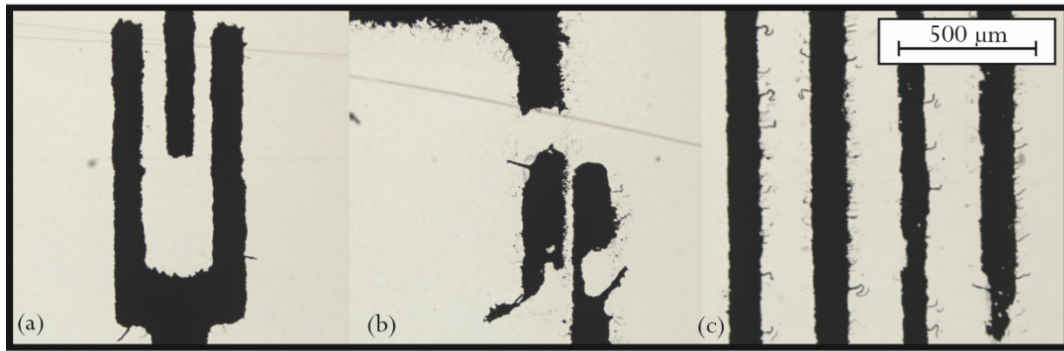


Abbildung 2.8: Im Tampondruck hergestellte Source-Drain-Elektroden. Es sind drei typische Fehlerbilder zu erkennen: Linienverbreiterung (a), Fehlstellen (b) und Ausfransungen an den Elektroden (c).

2.3.5 Verunreinigungen

Verunreinigungen in flüssigprozessierten OFETs können durch äußere Einflüsse wie Staub, Lösemiteileinschlüsse als Überbleibsel des Beschichtungsprozesses (Salleo, 2009) oder durch vorhandene Rückstände aus der Produktion entstehen (Coropceanu, 2007).

Staub oder sonstige von außen in das System eingebrachte Fremdkörper können zur Bildung von Nadellöchern (engl. pinholes) oder gar zu Entnetzung führen (Tone, 2016), siehe auch Abbildung 2.7. Man spricht in letzterem Fall von heterogener Nukleation. Ebenfalls können durch die Nutzung ungeeigneter Maschinenkomponenten Verunreinigungen durch den Prozess eingebracht werden. So stellt in der gedruckten Elektronik die Verwendung bestimmter Fotopolymerdruckformen in Kombination mit aromatischen Lösemitteln ein Problem dar. Bestandteile der Druckform konnten bereits in erzeugten Halbleiterschichten nachgewiesen werden (Theopold, 2014; Trollmann, 2014). Solche organischen Verunreinigungen oder Rückstände aus der Halbleitersynthese werden zum Problem, wenn ihre Grenzorbitale in die Lücke zwischen HOMO und LUMO des Halbleiters fallen. Dort können sie Fallenzustände bilden (Coropceanu, 2007).

3. Elektronisches Time-Of-Flight-Verfahren und Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung

Um das dynamische Verhalten von OFETs bzw. Transistoren im Allgemeinen untersuchen zu können wurde das sogenannte *elektronische Time-Of-Flight-Verfahren* (kurz *eTOF*) implementiert. Dieses geht auf ein bereits 1969 von *Burns* (1969) vorgestelltes Verfahren zurück. *Burns* hatte damals zum Ziel den Beweis zu erbringen, dass MOSFETs auf Spannungsstufen – in seinem Fall an der Gate-Elektrode erzeugt – zeitlich verzögert und mit einer gewissen Anstiegszeit des resultierenden Stroms reagieren. Es ist ihm gelungen den Drain-Strom mathematisch zu beschreiben und einen Ausdruck für die zeitliche Verzögerung sowie für die Anstiegszeit zu finden. Interessanterweise bestand in diesem Fall die mathematische Beschreibung vor der experimentellen Bestätigung dieses Phänomens. Fast 40 Jahre später griff die Gruppe um *Ananth Dodabalapur* dieses Verfahren, und vor allem die Extraktion der Verzögerungszeit zur Charakterisierung organischer Transistoren, auf (Dunn, 2006).

Die folgende Beschreibung des eTOF-Verfahrens erfolgt in zwei Abschnitten: Zunächst wird der Stand der Technik und Wissenschaft zusammenfassend dargestellt (*Theorie zum TOF-Verfahren*). Im Anschluss daran werden das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Messverfahren sowie dessen Auswertemethodik erläutert (*Praktische Umsetzung des eTOF-Verfahrens an gedruckten OFETs*).

3.1 Theorie zum eTOF-Verfahren

Das Messprinzip, die verschiedenen, aus der Literatur bekannten, Messaufbauten sowie die Unterschiede zu *optischen Time-Of-Flight-Messungen* (dt. Flugzeit oder Laufzeit, kurz TOF) und *CELIV* (kurz für engl. *C*harge *E*xtraction by *L*inearly *I*ncreasing *V*oltage, dt. Ladungsextraktion bei linear ansteigender Spannung) werden im Rahmen dieser Zusammenfassung des Stands der Technik und Wissenschaft vorgestellt. Es erfolgt ebenfalls die Definition des wichtigsten Parameters – der *Transitzeit*. Weiterhin werden Methoden zur *Extraktion von Parametern* wie Mobilität und Schwellspannung gezeigt, gefolgt von einer Zusammenstellung der Literatur von *Erkenntnissen aus eTOF-Messungen*.

3.1.1 Messprinzip und Aufbau

Ziel der Messungen ist es, Größen zur Ermittlung der Ladungsträgergeschwindigkeit aus der transienten Antwort eines Transistors auf einen an Source angelegten Rechteckpuls zu extrahieren. Unter der *transienten Antwort* des Transistors wird die sich mit der Zeit ändernde Antwort des Transistors – in

diesem Fall eine Spannungsantwort – auf eine Störung hin verstanden (Shenkman, 2005). Sie steht im Gegensatz zum *stationären Zustand*, bei dem die Spannung über die Zeit im Falle von Gleichspannungsmessungen konstant ist oder sich im Falle von Wechsellspannungsmessungen periodisch mit gleich bleibender Amplitude und gleichbleibendem Phasenwinkel verhält. Ersterer wird dem dynamischen Verhalten des Transistors zugeordnet, zweiterer dem statischen. Transiente Zustände bilden stets den Übergang zwischen zwei stationären Zuständen.

Der transiente Strom wird in diesem Verfahren über einen Messwiderstand ermittelt und mit Hilfe eines Oszilloskops aufgezeichnet. Man verspricht sich hierdurch Einsicht in die Transportmechanismen, die in nicht-statischen Schaltelementen stattfinden (Cobb, 2010).

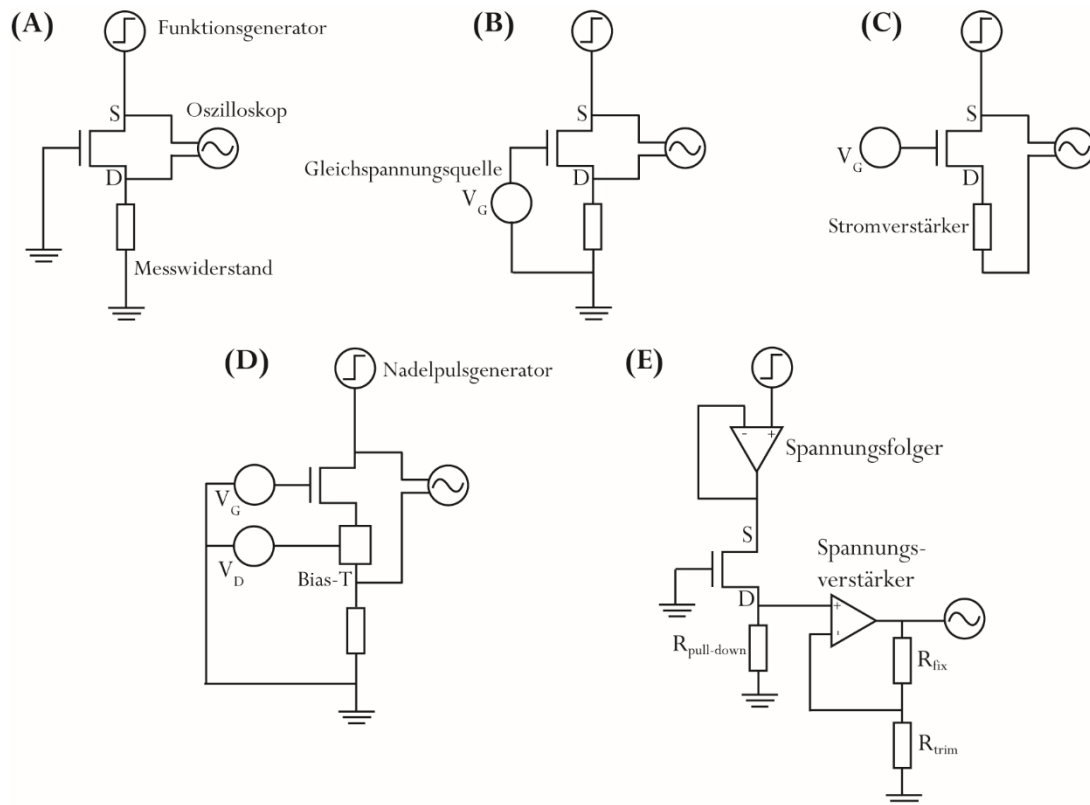


Abbildung 3.1: Messaufbauten der in der Literatur bekannten eTOF-Messungen. Die Ersatzschaltbilder wurden aus Abbildungen und Beschreibungen der entsprechenden Quellen nachempfunden: (A) (Dunn, 2006); (B) (Ganz, 2013b); (C) (Dunn, 2009)⁵; (D) (Basu, 2006); (E) (Dost, 2007).

Im simpelsten Aufbau, siehe Abbildung 3.1 (A), ist der Halbleiter über Source direkt mit einem Funktionsgenerator verbunden. Ein Oszilloskop zeichnet sowohl den eingehenden Rechteckpuls als auch

⁵ Es ist anzumerken, dass in der angegebenen Literatur zu Aufbau (C) kein Bezugsknotenpunkt zur Masse angegeben ist. Es wird vermutet, dass der Bezug zur Masse analog zu (B) über die Gleichspannungsquelle an Gate erfolgt.

die transiente Antwort an Drain über einen Messwiderstand auf, siehe Abbildung 3.2. Die Gate-Elektrode ist geerdet. Mit diesem Aufbau, also mit einer Gate-Spannung von 0 V, ist es möglich die Ausbildung des Transistorkanals sowie den Transport der Ladungsträger in dem sich durch den Puls lateral ausbildenden E-Feld zu beobachten. (Dunn, 2006; Dunn, 2009; Cobb, 2010; Ha, 2012; Lee, 2011; Weis, 2009; Basu, 2007)

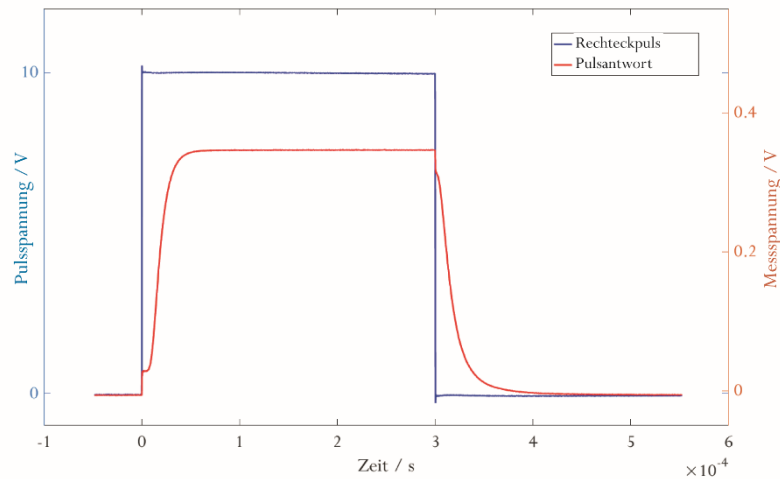


Abbildung 3.2: Rechteckpuls und Pulsantwort aus einer Messung nach Aufbau (A) in Abbildung 3.1.

In einem erweiterten Aufbau, siehe Abbildung 3.1 (D), werden Drain und Gate mit einer Gleichspannungsquelle verbunden und der Rechteckpuls durch einen schärferen nadelartigen Impuls ersetzt (Basu, 2006). Über ein T-Stück wird der transiente Strom am Oszilloskop getrennt von dem in die Gleichspannungsquelle fließenden Strom aufgenommen. Da sowohl an der Gate-Elektrode als auch an der Drain-Elektrode eine Grundspannung angelegt wird, bildet sich vor Beginn der Messung bereits der Transistorkanal vollständig aus. Untersuchungsgegenstand ist hier nicht mehr die Ausbildung des Kanals, sondern ein Paket von zusätzlichen Ladungsträgern, dessen Bewegung durch den Kanal beobachtet wird. Diese Abwandlung des Verfahrens wird von Basu (2006) als eigentliche elektronische TOF-Messung bezeichnet, da sie eher einer elektrischen Form des kurzen Laserpulses in optischen TOF-Messungen entspricht. Abbildung 3.1 (B) zeigt eine abgewandelte Kombination aus beiden Verfahren, also mit vorgespanntem Gate und Rechteckpuls, die von uns, d.h. Ganz und Pankalla (Ganz, 2013b; Pankalla, 2013b; Pankalla, 2014), bereits eingeführt wurde. Eine weitere Methode wird von Dunn *et al.* (2009) vorgeschlagen, siehe Abbildung 3.1 (C). Diese ist ausgelegt für Transistoren, bei denen der Verschiebungsstrom dominiert. Strom setzt sich zusammen aus dem Verschiebungsstrom und dem Leitungsstrom, wobei ersterer auf dem Fließen von Ladungsträgern (Elektronen) in einem ruhenden

Medium beruht und letzterer einer nicht auf Massetransport basierenden zeitlichen Änderung des elektrischen Feldes entspricht (Stiny, 2012). Unter vorgespanntem Gate wird bei dieser Methode also die Spannung rampenartig – ähnlich zu CELIV – in einem Zeitraum von mehreren Zehnmikrosekunden erhöht. Anstiegszeiten aus eTOF-Messungen liegen vergleichsweise in der Größenordnung von Nanosekunden (einstelliger bis unterer dreistelliger Bereich). Eine Methodik zur Extraktion der Mobilität aus diesen Daten bestand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung allerdings noch nicht. In dem in Abbildung 3.1 (E) gezeigten Aufbau ist der Transistor an Drain mit einem pull-down Widerstand, welcher die eingehende Spannung auf das Erdungspotential „herunter zieht“, in einem Spannungsteiler-ähnlichen Aufbau in Serie geschaltet (Dost, 2007; Dost, 2008). Von einem Signalgenerator, welcher durch einen Spannungsfolger mit Source verbunden ist, wird das Rechtecksignal eingebracht. Das Antwortsignal V_d wird über einen Spannungsverstärker an ein Oszilloskop übertragen. Die Spannungsverstärkung G lässt sich über den Widerstand R_{trim} regulieren, welchen es so lange zu trimmen gilt, bis das Produkt aus Spannungsverstärkung und Drain-Spannung der Spannung an Source entspricht. Das zuletzt beschriebene Verfahren hatte das Ziel OFETs in 0,1 s charakterisieren zu können. Dies sollte ein Massenscreening von als Sensoren fungierenden OFETs ermöglichen. Neben den technischen Vorteilen, wie einer niedrigen Versorgungsspannung und einem hohen Grad an Automatisierbarkeit, soll die Methode durch eine hohe Sensibilität gegenüber Schwankung in organischen Halbleitern, welche eine sehr niedrige Mobilität aufweisen, überzeugen. Jedoch konnten von *Dost et al.* (2007) auch Verzögerungen im Anstieg der Drain-Spannung festgestellt werden, die neben den üblichen parasitären Kapazitäten im Messaufbau auf den Spannungsverstärker zurückzuführen sind.

Doch wie lassen sich die Prozesse, die während einer eTOF-Messung stattfinden, beschreiben? Für den simpelsten Aufbau (A), d.h. ohne Gate-Spannung und mit einfachem Rechteckpuls, haben *Dunn et al.* (2009) den Weg der Ladungsträger bereits mit Hilfe des Hopping-Modells am Beispiel eines p-Halbleiters beschrieben. Auf die Entstehung der Löcher durch Anregung eines Elektrons wird in dieser vereinfachten Darstellung nicht eingegangen. Eine freie Übersetzung der Beschreibung von *Dunn et al.* folgt nun:

Die Kanalausbildung beginnt direkt mit dem Anschalten des Pulssignals. Löcher werden an Source in den Halbleiter injiziert, während das laterale E-Feld sich mit der Zeit ausbildet. Die Akkumulation der Löcher beginnt in Nähe der Source-Elektrode an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum. Dabei besetzen sie zunächst die für sie niedrigerenergetischen Zustände, wodurch sie eine geringere Mobilität aufweisen. Mit zunehmender Besetzung werden nun Zustände weiter entfernt vom HOMO besetzt, die eine laterale Fortbewegung ermöglichen. Mit zunehmender Zeit steigt also die

Wahrscheinlichkeit des lateralen Hüpfens in Richtung Drain. Auf ihrem Weg in Richtung Drain fallen die Löcher von den Zuständen höherer Mobilität in unbesetzte Fallenzustände ab. Die Transitzeit beschreibt nun die Zeit, bei der die ersten Löcher an Drain verzeichnet werden können und der Kanal somit ausgebildet ist. Zu diesem Zeitpunkt liegt die Verteilung der Löcher im Halbleiter rampenförmig vor: an Source befinden sich sehr viele Ladungsträger, während an Drain die Ladungsträgerdichte sehr niedrig ist.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der in dieser Arbeit verwendete Begriff des *Ladungsträgertransports* einen Signaltransport darstellt und die Ausbreitung eines elektrischen Impulses, in diesem Falle eines Rechteckpulses, durch den Halbleiter beschreibt. In diesem Zusammenhang wird oft das vereinfachte Bild der Ladungsträgerlaufzeiten verwendet. Hier wird suggeriert, dass ein Ladungsträger, der an der Source-Elektrode in den Halbleiter injiziert wird, den Kanal vollständig durch Hüpfen vom einen Zustand zum nächsten passiert und an der Drain-Elektrode detektiert wird. Diese Beschreibung erlaubt eine anschauliche Darstellung der Begriffe Transitzeit, siehe Abschnitt 3.1.3, sowie der Ladungsträgergeschwindigkeit. Vielmehr lässt sich der oben definierte Ladungsträgertransport in organischen Halbleitern aber analog zur Ausbreitung einer elektrischen Ladungsdichtewelle beschreiben. Durch Besetzen eines Zustandes wird ein vorhandener Ladungsträger angeregt einen benachbarten Zustand zu besetzen. Auf diesem Weg kann injizierte Ladung durch den Halbleiter transportiert werden. (Bao, 2007; Köhler, 2015)

Für die mathematische Beschreibung der Antwort auf einen elektrischen Puls gibt es zwei Ansätze: zum einen den *Ansatz der Übertragungsleitung* nach Burns (1969; Dunn, 2009; Basu, 2007) und zum anderen den *Quasi-Eindimensionalen Ansatz* nach Basu (2007). Da Basu gezeigt hat, dass beide Ansätze in derselben Differentialgleichung zur Beschreibung des Kanalstroms enden, wird hier nur kurz der Übertragungsleitungsansatz vorgestellt. Die ausführlichen Herleitungen können Basu (2007) – für Anlegen des Pulses an der Source-Elektrode – und Burns (1969) – für Anlegen des Pulses an der Gate-Elektrode – entnommen werden.

Es wird angenommen, dass der Transistorkanal aus einer endlichen Menge N_{seg} an in Serie geschalteten Widerständen besteht, die den Weg von Source zu Drain bilden. Auf jeden Widerstand folgt die Verknüpfung zu einem Kondensator, über welchen die Verbindung zur Gate-Elektrode gebildet wird. Diese Elemente bilden N einheitlich lange Segmente. Bei gegebener Spannung laden Ladungen im i -ten Segment zunächst den i -ten Gate-Kondensator, bevor sie durch den i -ten Widerstand das Segment $i+1$ betreten. Die Segmentkapazität C ist proportional zur Gate-Kapazität und konstant in jedem Segment. Die Widerstände sind jedoch Funktionen der zwischen Gate und dem Substrat anliegenden Spannungsdifferenz und somit orts- und zeitabhängige Funktionen der Kanalspannung $V(x, t)$. Unter

Betracht der Leitfähigkeit pro Segment sowie der Spannungserniedrigung, die durch Verschiebungsströme erfolgt, gelangt man zu Gleichung 3.1 für den Strom $I(x,t)$ in Abhängigkeit von $\frac{\partial V(x,t)}{\partial x}$, der Wellenfront, die sich durch den Kanal bewegt (Basu, 2007):

$$I(x,t) = -\mu \cdot C \cdot (V_g - V_t - V(x,t)) \cdot \frac{\partial V(x,t)}{\partial x} \quad \text{Gleichung 3.1}$$

mit der Gate-Spannung V_g und der Schwellspannung V_t . Nach mehrfachem mathematischen Umformen sowie unter Eliminierung von $I(x,t)$ und den Annahmen, dass V_g null ist und V_t vernachlässigbar klein, ergibt sich die Gleichung für den Transport des Pulsspannungsproblems (Basu, 2007):

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} (V')^2 = \frac{2}{\mu} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial t} \quad \text{Gleichung 3.2}$$

mit $\tilde{V}(x,t) = V_g - V_t - V(x,t)$. Bei der Lösung dieser Gleichung gelangt man über Substitution zu einem Ausdruck, der intuitiv an die Ausbreitung einer Welle erinnert. Die Lösung der Gleichung teilt sich in zwei Abschnitte: einen Bereich in dem die Wellenfront Drain noch nicht erreicht hat ($t < t_{tr}$) und einen nachdem die Wellenfront Drain erreicht hat ($t > t_{tr}$). Für den ersten Bereich kann die Transitzeit t_{tr} numerisch zu

$$t_{tr} = 0,38 \cdot \frac{L^2}{\mu \cdot V_{gs}} \quad \text{Gleichung 3.3}$$

genähert werden, mit der Mobilität μ , der Gate-Source-Spannung V_{gs} und der Kanallänge L (Basu, 2007). Für den Bereich, in dem die Ladungsträger Drain erreicht haben, kann die Gleichung mit Hilfe von Variablenseparation und einer *Bessel-Funktion* gelöst werden. Ein Gewichtungsfaktor von 0,53 führt hier zum besten Ergebnis (Basu, 2007).

$$I_d(\tau) = \frac{\mu \cdot C_l \cdot W}{L} \cdot V_{gs}^2 \{1 - 0,83 \exp(-6,406(\tau - 0,38)) - 0,17 \exp(-2 \cdot 6,406(\tau - 0,38))\}$$

Gleichung 3.4

mit $\tau = t \cdot \left(\frac{L^2}{\mu \cdot V_{gs}} \right)^{-1}$

Gleichung 3.4 beschreibt die ansteigende Flanke des Signals bei 0 V Gate-Spannung und dient der Simulation der Messung nach Aufbau (A), siehe Abbildung 3.1.

3.1.2 Vergleich von eTOF, optischer TOF und CELIV

Das *elektronische Time-Of-Flight-Verfahren* ähnelt zwei häufig genutzten Verfahren zur Ermittlung der Mobilität von Ladungsträgern in Halbleiterschichten sehr: dem *optischen TOF-Verfahren* und der *CELIV*.

Im *elektronischen Time-Of-Flight-Verfahren* wird an einen Transistor ein Spannungspuls angelegt und seine transiente Antwort aufgezeichnet. Aus dieser lassen sich verschiedene Parameter extrahieren, aus denen sich u.a. die Mobilität berechnen lässt, siehe Abschnitt 3.1.4. Die Messung findet ohne weitere Modifikation an einem fertig gestellten Transistor über die Source-, Drain- und Gate-Elektroden statt.

Bei *optischen Time-Of-Flight-Messungen* wird der zu untersuchende Halbleiter in einer Sandwichstruktur zwischen zwei Elektroden eingebettet, von denen mindestens eine transparent sein muss. Durch einen Laserpuls werden Elektron-Loch-Paare gebildet, welche dann getrennt voneinander zu den jeweiligen vorgespannten Elektroden abwandern. Der fließende Strom wird in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Hoch geordnetes Material führt zu einem scharfen Peak, ungeordnete Materialien führen zu einer Verbreiterung. (Coropceanu, 2007; Köhler, 2015)

Bei *CELIV-Messungen* wird ein – wie der Name bereits sagt – linear ansteigendes Spannungssignal (Rampe) an den Halbleiter angelegt und seine transiente Antwort abgegriffen. CELIV-Messungen können an einer Vielzahl von Bauteilen angewandt werden und benötigen im Gegensatz zur optischen TOF keine transparenten Elektroden. Da viele Halbleiter allerdings über wenig Ladungsträger bei Raumtemperatur verfügen, werden in einer Abwandlung des CELIV – dem sogenannten *Photo-CELIV* – Ladungsträger zunächst mittels eines Lasers erzeugt. Soll nur eine Art Ladungsträger – Elektronen oder Löcher - untersucht werden, wird eine dielektrische Schicht vor der entsprechenden Elektrode angebracht und die Injektion somit verhindert. Man spricht von MIS-CELIV, dem *Metal-Insulator-CELIV*. (Tiwari, 2009; Köhler, 2015; Armin, 2014)

Die eTOF-Messungen unterscheiden sich in drei Hauptpunkten von den beiden anderen beschriebenen Methoden: Erstens erfolgt in optischen TOF-Messungen generell, und in den meisten CELIV-Messungen ebenfalls, der Ladungstransport senkrecht zum Substrat und somit zur eigentlichen Transportrichtung, die sich im Transistor formieren würde. Hinzu kommt außerdem, dass für optische TOF-Messungen die Halbleiterschicht mehrere Mikrometer Schichtdicke aufweisen muss, um ausreichende „Flugzeiten“ erzeugen zu können (Chan, 2013). Zweitens werden die Ladungsträger in optischen TOF-Messungen photonisch generiert und ihre Dichte hängt somit von der Wellenlänge bzw.

dem Spektrum der Lichtquelle ab. Dies gilt ebenso für Photo-CELIV. Im Gegensatz dazu hängt die Injektion bei eTOF-Messungen von der Injektionsbarriere zwischen (Metall-)Elektrode und Halbleiter ab und gibt somit reale Transistorbedingungen wieder. Als dritter Punkt sei erwähnt, dass der Verschiebungsstrom in eTOF-Messungen um Größenordnungen kleiner ist als der Leitungsstrom. In optischen TOF Messungen spielt dieser jedoch eine erhebliche Rolle. (Basu, 2009)

3.1.3 Definition der Transitzeit

Der am häufigsten extrahierte und weiter verwertete Messwert der eTOF-Verfahren ist die *Transitzeit* t_{tr} (Cobb, 2010; Dost, 2008; Dunn, 2006; Dunn, 2009). Sie dient beispielsweise der Ermittlung von Mobilität und Schwellspannung und sorgt somit für einen sich fortplanzenden Fehler bei schlechter Extraktion (Basu, 2006). In der Literatur wird sie auch als *Turn-On-Time* (Lee, 2011; Ha, 2012), *Delay-time* (Basu, 2007) oder *Transportzeit* (Weis, 2009) bezeichnet. Die gängigste – und in dieser Arbeit verwendete – Definition ist die folgende:

Die Transitzeit ist die Zeit, die zwischen dem Start des Spannungspulses und den ersten Änderungen des Stroms an Drain vergeht.

Die Transitzeit entspricht der Zeit, die – vereinfacht gesagt – die schnellsten Ladungsdichtewellen brauchen, um den Kanal zu passieren. Sie ist von solcher Wichtigkeit, da sich aus ihr weitere Parameter ableiten lassen, wie die Mobilität oder das Vorliegen von Unordnung über die Poole-Frenkel-Beziehung, siehe Abschnitt 3.1.4.4, und weil sie die inverse Grenzfrequenz des Transistors darstellt (Bürgi, 2003). Ein Transistor kann nicht schneller schalten als die schnellsten Ladungsdichtewellen an Transportzeit benötigen. Es wird unterschieden zwischen einer Transitzeit für das Anschalten des Spannungspulses $t_{tr,on}$ und das Abschalten $t_{tr,off}$ (Dost, 2008; Sirringhaus, 2000), siehe auch Abbildung 3.4.

Eine leicht abweichende Definition wurde von *Weis et al.* (Weis, 2009) postuliert: Der Zeitraum zwischen dem Anlegen des Pulses und der Verzeichnung der ersten Ladungsträger, genannt Transportzeit t_p , setzt sich aus zwei in Serie geschalteten Elementen, der Ladungszeit t_{ch} und einer von ihm abweichend definierten Transitzeit t_{tr} , zusammen. Die Transportzeit beinhaltet somit die Ladungsinjektion, die Akkumulation und den Transport durch den Kanal. Mit Einschalten des Pulses lädt sich zum einen das Source-Gate-System auf und zeitgleich beginnt, trotz der irreführenden Bezeichnung der Serienschaltung, der Transport in Richtung Drain.

3.1.4 Parameterextraktion und Datenauswertung

Im Folgenden werden die verschiedenen Parameter, die aus eTOF-Messungen extrahiert werden können vorgestellt. Für die meisten Parameter gibt es mehrere Methoden der Extraktion, welche hier aufgeführt werden.

3.1.4.1 Ermittlung der Transitzeit

Wie in Abschnitt 3.1.3 erläutert, stellt die Transitzeit t_{tr} den wichtigsten und am häufigsten verwendeten Parameter dar, der aus der transienten Antwort eines Transistors auf einen Rechteckpuls extrahiert wird. Messtechnische Unterschiede ergeben sich jedoch durch die oft unterschiedliche Definition des Start- und Endzeitpunkts. Im einfachsten Fall – bei einem relativ rausch- und reflexionsarmen Signal – kann die Transitzeit am Anstiegspunkt der Drain-Spannung abgelesen werden (Dunn, 2006), z.B. bei Erreichen von 2 % des maximalen Spannungswertes (Dunn, 2010), siehe Abbildung 3.3. Als Alternative hingegen, nehmen *Dunn et al.* (Dunn, 2009) in ihren weiteren Arbeiten sowie *Basu* (2007) die Hälfte der Anstiegszeit des Pulses als Startpunkt und entnehmen die Transitzeit entsprechend aus der Hälfte der Anstiegszeit der Pulsantwort, siehe Abbildung 3.3.

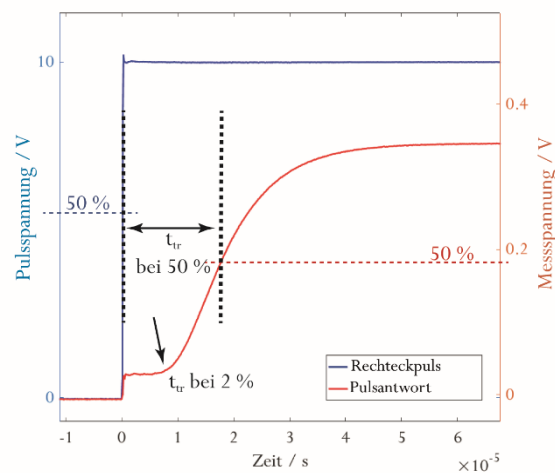


Abbildung 3.3: Ermittlung der Transitzeit nach *Dunn et al.* (2009) und *Basu* (2007) am Beispiel des Transistors 0436#22⁶, siehe Anhang A.1.

Weis et al. (Weis, 2009) nutzen für kurze Kanallängen einen ähnlichen Zeitbereich, beschreiben dies nur auf andere Weise: Bei dem gemessenen TOF-Strom handelt es sich um die Summe aus

⁶ Für Nomenklatur siehe Abschnitt 4.1.

Verschiebungs- und Leitungsstrom. Der untere Teil der ansteigenden Flanke stellt den Anteil des Verschiebungsstroms dar. Dem exponentiellen Verlauf am Ende der ansteigenden Flanke liegt der Ladeprozess des Transistorkanals zugrunde. Man trifft hier die Annahme, dass der Kanal noch nicht vollständig geladen ist, wenn die ersten Ladungsträger Drain erreichen. Dieser nicht-lineare Verlauf erschwert jedoch die Extraktion der von ihnen deklarierten Transportgeschwindigkeit der Ladungsträger, siehe Abschnitt 3.1.3. Für den Verschiebungsstrom gilt, dass er bereits ansteigt, bevor die ersten Ladungsträger Drain erreicht haben ($t < t_{tr}$) und dass er gleich null ist, wenn die Ladungsträger Drain erreicht haben ($t > t_{tr}$). Außerdem kann der Leitungsstrom durch den konstanten Source-Drain-Strom oder eine Annäherung an den konkaven Kurventeil beschrieben werden. Man sollte die Transitzeit t_{tr} folglich aus dem „Übergangspunkt“ der transienten Strom-Kurve ermitteln, welcher in Weis' Messungen für kurze Kanallängen (40 μm) etwa bei 50 %⁷ der maximalen Spannung liegt.

Tabelle 3.1: Übersicht über ermittelte Transitzeiten aus der Literatur. Messaufbau und Methode sind für jede Transitzeit mit Bezug auf Abbildung 3.1 angegeben, wobei nicht aufgeführte Extraktionsmethoden mit keine Angabe (k. A.) gekennzeichnet sind.

Quelle	Material	Transitzeit μs	Kanallänge μm	Pulshöhe V	Messaufbau Abb. 3.1	Methode
(Dost, 2008)	PTAA	~ 200 (on) ~ 600 (off)	20	3	(E)	k. A.
(Dost, 2008)	PTAA	~ 1500 (on) ~ 4500 (off)	60	3	(E)	k. A.
(Dost, 2008)	PTAA	~ 2500 (on) ~ 7500 (off)	75	3	(E)	k. A.
(Dunn, 2009) abgelesen aus Abbildung 3	Pentacen	0,525	7,5	30	(A)	Mitte der Flanke
(Lee, 2011) abgelesen aus Abbildung 2	ZnO	3	50	3	(A)	Startpunkt Flanke
(Weis, 2009) abgelesen aus Abbildung 3	Pentacen	11	40	20	(A)	Übergangspunkt

Des Weiteren kann die Transitzeit aus dem Schnittpunkt der beiden Geraden in einem $\log I$ vs. $\log t$ -Plot ermittelt werden (Basu, 2006). Um den zeitlichen Abläufen dieser Transportvorgänge eine Größenordnung zuordnen zu können, sind in Tabelle 3.1 in der Literatur ermittelte Transitzeiten exemplarisch zusammengestellt.

⁷ Abgelesen aus Figure 1 und Figure 2 in Weis et al. Weis, 2009.

3.1.4.2 Ermittlung der Mobilität und Schwellspannung

Die dynamische Mobilität μ_{dyn} kann aus Messaufbau (A), siehe Abbildung 3.1, nach Gleichung 3.5 ermittelt werden (Dunn, 2009):

$$\mu_{dyn} = 0,38 \cdot \left[\frac{L^2}{t_{tr} (V_{gs} - V_t)} \right] \quad \text{Gleichung 3.5}$$

Der Faktor 0,38 entstammt den Berechnungen von *Burns* (1969) und *Basu* (2007) und wird der Ausbildung des Kanals bei 0 V Gate-Spannung zugeschrieben, da der zweite Faktor der Mobilitätsgleichung aus optischen TOF-Messungen entspricht (Dunn, 2009). *Burns* konnte außerdem zeigen, dass auch die Anstiegszeit reziprok mit der Mobilität zusammenhängt. Dieser Ausdruck entspricht bis auf den Vorfaktor (0,3 statt 0,38) dem in Gleichung 3.5. *Weis et al.* (Weis, 2009) bedienen sich für die Transitzeit ebenfalls des Ausdrucks aus Gleichung 3.5, allerdings verwenden sie 0,5 als Vorfaktor. Die Mobilität wird aus einem Plot der Transportzeit – nicht Transitzeit – über L^2 ermittelt. Dabei schneidet die Gerade die Abszisse bei einem Wert größer null, welcher der Ladungszeit t_{ch} zugeschrieben wird. Wird die Nadelpulsmethode mit vorgespanntem Gate (D) nach *Basu et al.* (2006) verwendet und geht von einem konstanten elektrischen Feld im Kanal aus, so vereinfacht sich Gleichung 3.5 zu

$$\mu_{dyn} = \frac{L^2}{t_{tr} \cdot |V_{ds}|} \quad \text{Gleichung 3.6}$$

Eine weitere Möglichkeit ist die näherungsweise Berechnung nach *Dunn et al.* (Dunn, 2006):

$$\mu_{dyn} = \frac{L^2}{\frac{A}{2} (t_2^2 - t_1^2) + V_{max} (t_{tr} - t_2)} \quad \text{Gleichung 3.7}$$

mit der Startzeitpunkt des Pulssignals t_1 , dem Zeitpunkt bei Erreichen der maximalen Spannung des Pulssignals t_2 , der Transitzeit t_{tr} , sowie der Höhe des Spannungspulses V_{max} und der Steigung des Spannungssignals A , die zwischen t_1 und t_2 bis zum Erreichen der Spannung V_{max} vorliegt.

In Aufbau (E), siehe Abbildung 3.1, nach *Dost et al.* (Dost, 2007) wird die Verstärkung G zur Ermittlung von sowohl der Mobilität μ als auch der Schwellspannung V_t aus Gleichung 3.8 benötigt.

$$\frac{V_s}{G} = \frac{W}{2L} \cdot R_p \cdot \mu_{dyn} \cdot C_i (V_{max} - V_t)^2 \quad \text{Gleichung 3.8}$$

mit der Höhe des an Source angelegten Pulses V_{max} , dem Pull-Down-Widerstand R_p , der Kanallänge L und -weite W . Aus dem Plot von $(V_{max}/G)^{1/2}$ vs. V_{max} ergeben sich Mobilität und Schwellspannung aus der Steigung bzw. dem Schnittpunkt mit der Abszisse. Nach *Dost et al.* (2008) wird die Mobilität aus Aufbau (E) anhand von Gleichung 3.9

$$\mu_{dyn} = \frac{L^2}{t_{tr} |V_{TOF}|} \quad \text{Gleichung 3.9}$$

aus der Steigung zweierlei Kurven ermittelt: t_{tr} vs. L^2 sowie $1/t_{tr}$ vs. $|V_{max}|$. Aus ersterem Plot erhalten *Dost et al.* eine Gerade, die der Theorie entsprechend den Ursprung schneidet. Aus letzterem eine Gerade, die den Ursprung nicht passiert. Diese Abweichung vom Ursprung V_l hat einen endlichen Wert und führt zu dem Postulat, dass die effektive Spannung V_{TOF} , die auf den Kanal wirkt, der angelegten Spannung V_{max} , reduziert um eine Spannung V_l , entspricht. Der Schnittpunkt der Gerade mit der Ordinate wiederum entspricht relativ genau dem Wert der statisch ermittelten Schwellspannung des Transistors. Somit postulieren sie, dass $V_l = V_t$ ist und folglich

$$V_{TOF} = V_s - V_t \quad \text{Gleichung 3.10}$$

3.1.4.3 Gütefaktor α

In Abbildung 3.4 ist die transiente Antwort eines Transistors in direktem Vergleich mit dem Rechteckpuls dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die zeitliche Verzögerung in der ansteigenden Flanke größer ist als in der abfallenden Flanke. Von Interesse ist also auch das Verhältnis der Transitzeiten der abfallenden Flanke (ausschaltend, $t_{tr,off}$) zur ansteigenden Flanke (einschaltend, $t_{tr,on}$), welches als ein Gütemaß⁸ für die Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum deklariert wird (*Dost*, 2008), siehe Gleichung 3.11.

$$\alpha = \frac{t_{tr,off}}{t_{tr,on}} \quad \text{Gleichung 3.11}$$

Das Verhältnis der beiden Transitzeiten α wird fortan als *Gütefaktor* α bezeichnet.

⁸ Mit $0 < \alpha < 1$. Eine ideale fallenfreie Grenzfläche entspräche dem Wert $\alpha=1$.

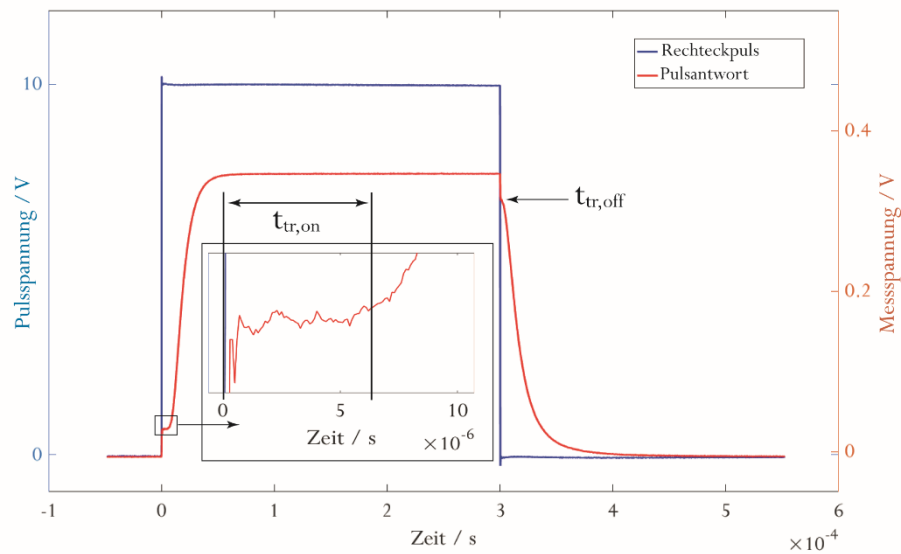


Abbildung 3.4: Transitziten der ansteigenden Flanke $t_{tr,on}$ und der abfallenden Flanke $t_{tr,off}$ am Beispiel des Transistors 0436#22. Es ist ersichtlich, dass die zeitliche Verzögerung im Anstieg wesentlich größer ist als beim Abfall.

Dost et al. (Dost, 2008) haben dokumentiert, dass in ihren Messungen α immer ungefähr 0,3 beträgt. Dies bedeutet, dass nach Anschalten des Transistors sich die Ladungsträgerdichte an Drain dreimal so langsam ändert wie nach Abschalten des Transistors. Solch ein Verhalten wird dem zeitintensiveren Befüllen leerer Fallen Zustände beim Anschalten des Transistors zugeschrieben. Beim Ausschalten des Transistors entleeren sich nur noch bereits gefüllte Fallen Zustände. Dieses Verhältnis von 0,3 wurde bereits von *Sirringhaus et al.* (Sirringhaus, 2000) beobachtet.

3.1.4.4 Überprüfung der Frenkel-Poole-Beziehung

Die *Frenkel-Poole-Beziehung* besagt, dass in ungeordneten organischen Halbleitern die Mobilität vom elektrischen Feld abhängt. Kann eine Abhängigkeit analog der Frenkel-Poole-Beziehung festgestellt werden, ist davon auszugehen, dass der Ladungstransport durch Unordnungseffekte eingeschränkt wird. Die Ladungsträgergeschwindigkeit ist nach *Cobb et al.* (2010) als Funktion des elektrischen Feldes gegeben durch

$$v \propto E \cdot \exp\left[\frac{\gamma\sqrt{E}}{k_B T}\right] \quad \text{Gleichung 3.12}$$

mit der Boltzmann-Konstante k_B und der Konstanten γ . Die benötigten Ladungsträgergeschwindigkeiten werden zum einen statisch aus dem linearen Bereich der Ausgangskennlinie und zum anderen dynamisch

aus den Stufenpulsmessungen ermittelt. In beiden Fällen werden die Geschwindigkeiten über das laterale elektrische Feld – welches sich aus $E_{lat} = V_{sd}/L$ ergibt – geplottet. Eine Variation des lateralen Feldes wird durch Variationen der Pulshöhe V_{max} bei definierten Kanallängen erreicht. Eine hohe Übereinstimmung mit einem Fit nach Gleichung 3.12 wird als Beweis für die intramolekulare Unordnung im Halbleiter interpretiert. (Cobb, 2010)

3.1.4.5 Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung

Dunn et al. (2006) postulieren, dass der Anstieg des transienten Stroms durch zwei Faktoren beeinflusst wird: der Ausbildung des Kanals und der Variabilität in den Geschwindigkeiten der Ladungsträger. Da die Transitzeit und die aus ihr resultierende dynamische Mobilität sich stets nur auf die schnellsten Ladungsträger beziehen, schwindet die Information über die Laufzeiten und Geschwindigkeiten der breiten Masse an Ladungsträgern, die sich ebenfalls im System befinden. Diese Information ist jedoch elementar wichtig, um den Ladungstransport durch den Halbleiter zu verstehen. Die Ladungsträgergeschwindigkeit kann durch eine Verteilung beschrieben werden, die von der Temperatur, dem elektrischen Feld und der Ladungsdichte abhängt (Lee, 2011).

Diese Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung wird ermittelt durch Differenzieren der mit dem Messwiderstand verrechneten transienten Antwort des Transistors. Hierdurch erhält man inkrementelle Stromwerte in Abhängigkeit der Zeit. Die gemessenen Zeitabschnitte – gegeben durch die Auflösung des Oszilloskops – werden durch Division mit der Kanallänge in eine Geschwindigkeit transformiert. Als Resultat erhält man eine Häufigkeitsverteilung der Ladungsträger über der Geschwindigkeit. Diese enthält im Allgemeinen ein bis zwei Peaks, die verschiedenen Pfaden durch den Halbleiter zugeordnet werden können. Stellt man zusätzlich Messungen zur Temperaturabhängigkeit an, können diese Peaks auch tieferen oder seichteren Fallenzuständen zugeordnet werden. (Lee, 2011)

Unterschiede im Grad der Kristallinität schlagen sich sowohl in einer Formänderung der Peaks als auch in einer Verschiebung der Verteilung entlang der Abszisse nieder (Ha, 2012).

3.1.5 Erkenntnisse aus eTOF-Messungen

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse, die aus eTOF-Messungen publiziert wurden, zusammengefasst. Es ist anzumerken, dass diese fast alle der Gruppe um *Ananth Dodabalapur* an der Universität von Austin, Texas, zuzuordnen sind.

3.1.5.1 Abweichung von der dynamischen zur statischen Mobilität

Tabelle 3.2 zeigt Beispiele für statische und dynamische Mobilitäten verschiedener Halbleitermaterialien.

Tabelle 3.2: Abweichungen der statischen und dynamischen Mobilität μ für verschiedene Halbleitermaterialien. Die Kanallänge, die Gleichung aus der die Mobilitäten ermittelt wurden, sowie der Aufbau sind für jedes Wertepaar (statisch/dynamisch) angegeben. Der Faktor ergibt sich aus $\mu(\text{dyn})/\mu(\text{stat})$.

Quelle	Material	Kanallänge μm	Ermittelt nach Gl.	Messaufbau nach Abb. 3.1	μ (dynamisch) cm^2/Vs	μ (statisch) cm^2/Vs	Faktor
(Basu, 2006)	Poly(2,5-bis(3-tetradecylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophen)	7,5	3.6	(D)	0,52	/	3
(Dost, 2007)	PTAA	10	3.8	(E)	0,00083	0,00089	1
(Dost, 2008)	PTAA	20	3.9	(E)	0,0033 (on) 0,012 (off)	0,0011	3
(Dost, 2008)	PTAA	60	3.9	(E)	0,0033 (on) 0,010 (off)	0,0006	3
(Dost, 2008)	PTAA	75	3.9	(E)	0,0032 (on) 0,010 (off)	0,0009	3
(Dunn, 2006) abgelesen aus Abbildung 4	Pentacen	7,5	4.7	(A)	$\sim 0,038$ [1] @ $V_{\text{gs}} = 20 \text{ V}$	/	/
(Dunn, 2009) abgelesen aus Abbildung 3	Pentacen	7,5	4.5	(A)	$\sim 0,026$ [2] @ $V_{\text{gs}} = 50 \text{ V}$	$\sim 0,018$ @ $V_{\text{gs}} = 50 \text{ V}$	1,5

Die *dynamische* oder auch *TOF-Mobilität* wurde sowohl bei *Dunn et al.* (2006) also auch bei *Dost et al.* (2008) wesentlich höher als die statisch ermittelte Mobilität verzeichnet. Dies liegt einerseits an der Tatsache, dass sich die Transitzeit t_{tr} nur auf die schnellsten Ladungsträger im Transistor bezieht. Andererseits sind TOF-Messungen unabhängig vom Kontaktwiderstand, welcher zu einer Erniedrigung der gemessenen Mobilität führen kann. Außerdem wird der relativ kleine Bias-Stress in den Zeitskalen der Messung ($< 100 \text{ ns}$) als Grund aufgeführt.

3.1.5.2 Abhängigkeit der Mobilität von $V_{\text{gs}}-V_{\text{t}}$

Bei der Analyse der extrahierten Mobilitäten bei einer Flankenanstiegszeit von $\sim 100 \text{ ns}$ an Pentacen-Transistoren für Pulshöhen V_{max} von 30-100 V finden *Dunn et al.* (2006) zunächst eine vermutete Abhängigkeit der Mobilität von der Pulshöhe V_{max} . Sie nimmt mit größer werdender Pulshöhe zu, bis sie

ab ca. 55 V in einen Plateaubereich gelangt. Dies könnte auf die mit zunehmendem V_{gs} ansteigende Ladungsträgerdichte zurückzuführen sein und wird verursacht durch eine Anhebung des Fermi-Niveaus der Ladungen im Kanal mit dem Zweck der Befüllung energetisch niedriger liegender Fallenzustände. Als weitere Ursache wird schlicht und ergreifend die Zunahme des sich lateral ausbreitenden elektrischen Feldes im Kanal genannt. *Dost et al.* (2008) zweifeln diese Abhängigkeit von V_{max} allerdings an. Sie führen die ansteigenden Mobilitätswerte mit V_{max} auf ein Vernachlässigen der Verschiebung um V_l zurück, siehe Abschnitt 3.1.4.2. Dies wird später von *Dunn und Dadabalapur* (2010) bestätigt. Die Mobilität steigt proportional mit $V_{gs}-V_t$ und nicht mit V_s .

3.1.5.3 Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgergeschwindigkeit

Die Temperaturabhängigkeit der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung haben *Lee et al.* (2011) an Zinkoxid-TFTs im Bereich von 77-300 K untersucht. Wie in Abschnitt 3.1.4.5 beschrieben, wurde die Verteilung aus der Ableitung der transienten Antwort gebildet und über die Geschwindigkeit geplottet. Bei sehr niedrigen Temperaturen (77 K) konnten zwei Peaks verzeichnet werden, die zwei Leitungspfaden durch den Halbleiter zugeordnet wurden. Die Zuordnung konnte bis auf die energetische Ebene heruntergebrochen werden: Der flache Peak bei hohen Geschwindigkeiten beruht auf seichten Fallenzuständen und der hohe Peak bei niedrigen Geschwindigkeiten beruht auf tiefen Fallenzuständen. Da das Befüllen und Entleeren von Fallenzuständen stark temperaturabhängig ist, schwindet der Unterschied zwischen beiden Peaks mit ansteigender Temperatur, bis er bei Raumtemperatur nicht mehr wahrnehmbar ist. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die schnellen Ladungsträger eine geringere Temperaturabhängigkeit aufweisen als die langsamen. *Dunn und Dadabalapur* (2010) haben die Temperaturabhängigkeit (117 - 300 K) der Ladungsträgergeschwindigkeit an Pentacen-Transistoren untersucht. Hierfür wurde die dynamische Ladungsträgergeschwindigkeit v_{dyn} – ermittelt aus der Kanallänge und der Transitzeit – mit der statischen Ladungsträgergeschwindigkeit v_{stat} – ermittelt aus der Mobilität im Sättigungsbereich und dem im Kanal wirkenden E-Feld – verglichen. Sie konnten zeigen, dass die dynamische Geschwindigkeit bei niedrigen Temperaturen geringer ist als die statisch ermittelte, was sich genau entgegengesetzt ergibt für hohe Temperaturen. Dieser Zusammenhang wird darauf zurückgeführt, dass die dynamische Geschwindigkeit bzw. Mobilität die Geschwindigkeit der Ladungsträger mit der höchsten Energie während der Kanalbildung repräsentiert, während die statische Geschwindigkeit bzw. Mobilität die durchschnittliche Geschwindigkeit im fertig ausgebildeten Kanal wiedergibt. Bei hohen Temperaturen weisen Ladungsträger hoher Energie höhere Geschwindigkeiten auf als der Durchschnitt im gebildeten Kanal. Da bei jeder Temperatur eine Verteilung der

Ladungsträgergeschwindigkeiten vorliegt, kommt es bei niedrigen Temperaturen zu einem Schwinden der Grenzen zwischen der dynamischen und statischen Verteilung und der Trend dreht sich um. Mit Hilfe eines Arrhenius-Plots konnten sie außerdem zeigen, dass die Aktivierungsenergie in dynamischen Messungen 7 meV höher ist als in statischen Messungen. Auch dies ist auf den Unterschied zwischen schnellsten Ladungsträgern und der durchschnittlichen Geschwindigkeit im Gleichgewichtszustand zurückzuführen.

3.2 Praktische Umsetzung des eTOF-Verfahrens an gedruckten OFETs

Das oben vorgestellte elektronische Time-of-Flight-Verfahren wird nun auf gedruckte OFETs angewandt. Im ersten Schritt werden die Transistoren anhand ihrer *statischen Kennlinien charakterisiert*. Auf Basis der dort ermittelten Kennwerte Mobilität und Schwellspannung werden die Transistoren für die dynamischen eTOF-Messungen ausgewählt. Der *Messaufbau* sowie die verwendeten Parameter der eTOF-Messungen werden im Anschluss vorgestellt. Abschließend erfolgt die Darstellung der MATLAB®-basierten *Auswertung*.

3.2.1 Vorbereitende statische Charakterisierung der Transistoren

Die statische Charakterisierung der Transistoren wurde in einem halbautomatisierten Messplatz, der im Spitzenclusterprojekt POLYTOS aufgebaut worden ist, vorgenommen. Für eine detaillierte Beschreibung der Hard- und Software sei auf *Pankalla (2014)* und *Hengen (2015)* verwiesen. Zugrunde liegt diesem Messplatz ein Skript, das die in Tabelle 3.3 dargestellten Kennlinien mit Schrittweite 1 V ermittelt.

Tabelle 3.3: Messbereiche der Transfer- und Ausgangskennlinien der statischen Transistorcharakterisierung. Bei Messung der Transferkennlinien wird die Gate-Spannung V_{gs} linear in 1 V Schritten bei konstanten Drain-Spannungen V_{ds} erhöht, bei den Ausgangskennlinien wird die Drain-Spannung V_{ds} linear unter konstanten Gate-Spannungen V_{gs} erhöht.

	V_{gs}	V_{ds}
Transferkennlinie	0 ... -60 V	0 / -5 / -15 / -40 V
Ausgangskennlinie	0 / -10 / -20 / -30 / -40 V	0 ... -60 V

Die Extraktion der Transistorparameter Mobilität μ , Schwellspannung V_t , On/Off-Ratio, maximaler Leckstrom I_{Leck} und maximaler Kanalstrom I_{ds} erfolgt anschließend mit einem im Projekt POLYTOS erstellten und auf den automatisierten Messplatz abgestimmten Excel-Makro (Pankalla, 2012b). Zu erwähnen ist hier, dass die Schwellspannung mit Hilfe der *Extrapolation in Saturation Methode* (engl., dt. Extrapolation in Sättigung) ermittelt wurde. Hierfür wurde der Drain-Strom der 40 V-Transferkennlinie logarithmisch über V_{gs} aufgetragen und im Punkt der steilsten Steigung eine Tangente angelegt. Der Schnittpunkt dieser Tangente mit der Abszisse ergibt die Schwellspannung V_t . Mit Hilfe von Gleichung 3.14 kann anschließend die Mobilität extrahiert werden (Pankalla, 2014; Hengen, 2015):

$$I_d = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C_{ox} \cdot \left(V_g - V_t - \frac{V_d}{2} \right) \cdot V_d \quad \text{Gleichung 3.13}$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{I_d}{C_{ox} \cdot \left(V_g - V_t - \frac{V_d}{2} \right) \cdot V_d} \cdot \frac{L}{W} \quad \text{Gleichung 3.14}$$

Als Output generiert das Makro eine Art Übersichtskarte über alle Transistoren eines Substrats, die zu jedem Transistor Mobilität, Schwellspannung, On-Off-Verhältnis sowie den maximalen Leck- und Kanalstrom aus jeweils der Transfer- und Ausgangskennlinie angibt.

3.2.2 Dynamische Charakterisierung der Transistoren

Die dynamische Charakterisierung der Transistoren erfolgte anhand von eTOF-Messungen nach Aufbau (B) in Abbildung 3.1. Ziel dieser Messungen ist es, eine für einen bestimmten Herstellungsprozess charakteristische Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung zu ermitteln und diese durch definierte Kennwerte in vergleichbarer Form darzustellen. Zunächst erfolgt nun die Beschreibung und Erläuterung des verwendeten *eTOF-Messaufbaus*. Im Anschluss daran werden die Transformation der in der eTOF-Messung aufgezeichneten Daten in eine Geschwindigkeitsverteilung der Ladungsträger sowie die Extraktion der definierten Kennwerte aus dieser erklärt (*Auswertung der eTOF-Messungen*).

3.2.2.1 Messaufbau der eTOF-Messungen

Mit Hilfe der eTOF-Messungen wird die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung in einem Transistor einer bestimmten Herstellungsweise und für einen bestimmten Halbleiter ermittelt. Hierfür wurden Rechteckpulse an Transistoren, die nach Abschnitt 4.5 und Abschnitt 4.6 hergestellt wurden, angelegt und die transiente Antwort gemessen, siehe Abschnitt 3.1.1.

Abbildung 3.5 zeigt das Schaltbild für die durchgeführten eTOF-Messungen. Die Kontaktierung des gedruckten Transistors erfolgte mittels Messnadeln an einem verschließbaren, gegen Lichteinfall abschirmbaren Transistormessplatz (Micro Probe Station von Intertek ASG). Hierfür wurden die Source-Drain-Elektroden vorab mit Toluol von den auf ihnen liegenden Halbleiter- und Dielektrikumsschichten befreit und anschließend mit Silbertinte (Circuit Scribe Pen der Fa. Elektroninks Inc.) verstärkt. Diese Verstärkung fand ebenfalls für die Gate-Elektrode statt. An der Gate-Elektrode wurde je nach Halbleiter eine konstante Gate-Spannung V_{gs} von -10 V (PIF8-TAA) bzw. 0 V (SP400) angelegt. Durch Anlegen einer

Gate-Spannung wird die Anzahl der sich an der Grenzfläche befindlichen Ladungsträger und somit die der besetzten Zustände erhöht. Es entstehen drei Messbereiche, die jeweils einen anderen Blickwinkel auf das System erlauben (mit der Gate-Source-Spannung V_{gs} , der Drain-Source-Spannung V_{ds} und der Schwellspannung V_t):

- | | |
|-------------------------|--|
| $V_{gs} = 0$ | Die wenigen an der Grenzfläche vorliegenden Ladungsträger wurden vor der Messung photonisch injiziert. Mit Änderung des Source-Drain-Potentials werden weitere Ladungsträger injiziert und bilden aufgrund der gleichzeitig entstehenden Potentialdifferenz an Source-Gate einen Leitungspfad entlang der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum zu Drain aus. |
| $V_{ds} < V_{gs} - V_t$ | Die Messung findet im linearen Bereich statt. Einige Ladungsträger haben sich bereits durch das an Gate entstehende E-Feld an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Gate akkumuliert. Durch den Spannungspuls werden zusätzliche Ladungsträger injiziert und in Drain entladen. Der lineare Bereich wird gewählt um das laterale Feld im Transistor konstant zu halten (Cobb, 2010). |
| $V_{ds} > V_{gs} - V_t$ | Die Messung findet im Sättigungsbereich statt. Ladungsträger haben sich bereits durch das am Gate entstehende E-Feld an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Gate mit von Source nach Drain linear abnehmender Dichte angeordnet. Durch den Spannungspuls werden zusätzliche Ladungsträger injiziert und in Drain entladen. |

Da der Betrag der Schwellspannung der PIF8-TAA-Transistoren stets kleiner zehn Volt betrug, entsprachen die Messungen dem linearen Bereich. Der Transistor wurde an Drain mit einem Funktionsgenerator der 33250A der Fa. Agilent Corp. verbunden. Das Signal (Rechteckpuls) des Funktionsgenerators wurde von einem Oszilloskop HAMEG 3524 der Fa. HAMEG GmbH zum einen direkt und zum anderen als Antwort des Transistors an Drain über einen Messwiderstand erfasst. Alle Messungen fanden unter Ausschluss von Licht bei 23 °C 20 s nach Abdunkelung und Start der Sequenz von Rechteckpulsen statt. Die Daten wurden am Oszilloskop erfasst und über 64 Messungen gemittelt. Die Positionierung der Nadeln wurde unter UV-freiem Licht vorgenommen.

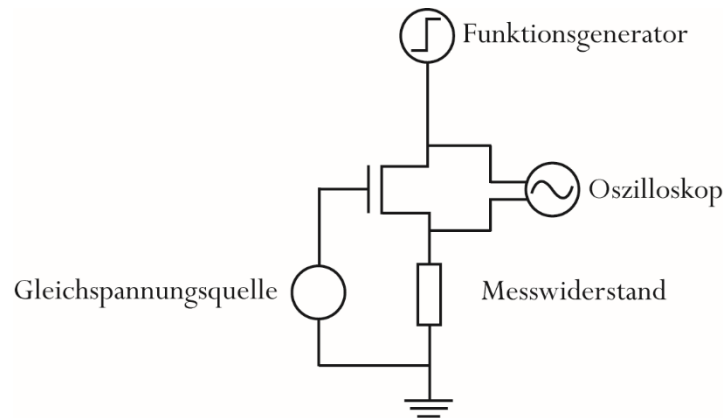


Abbildung 3.5: Schaltbild des Messaufbaus für eTOF-Messungen (Ganz, 2013b; Radkhah, 2015; Pankalla, 2014).

Je nach Halbleiter wurde ein Messwiderstand von $27\text{ k}\Omega$ bzw. $10\text{ k}\Omega$ verwendet, siehe Abschnitt 5.1.1. Dieser ist so klein zu wählen, dass ein nicht allzu großer Teil der Spannung über den Widerstand abfällt und zum anderen so groß zu wählen, dass Störquellen im Messaufbau in ihrer Erscheinung klein bleiben. Der Rechteckpuls und seine Anstiegszeit wurden in ihrer Länge so gewählt, dass die Impulsreflexionen innerhalb der Messleitungen möglichst vernachlässigbar bleiben und somit eine reproduzierbare Datenweiterverarbeitung garantiert werden konnte.

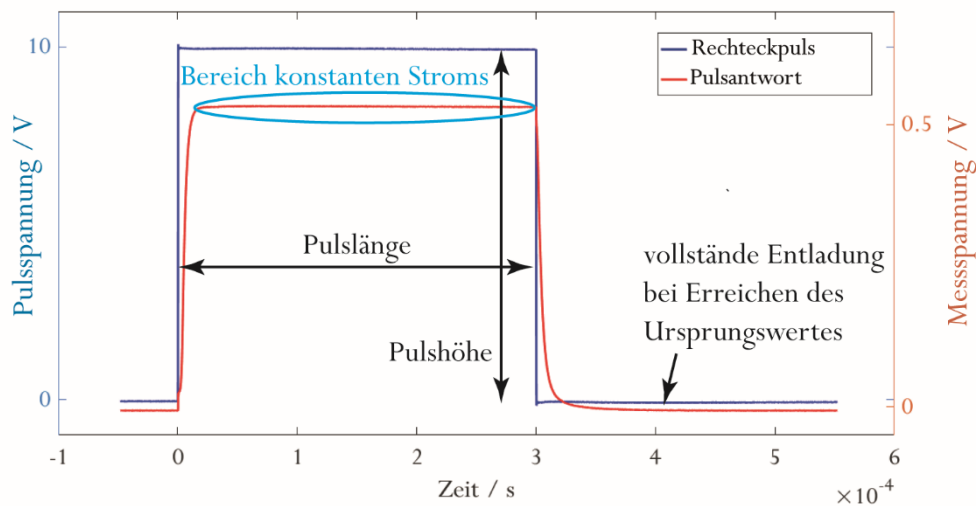


Abbildung 3.6: Rechteckpuls und Pulsantwort mit eingezeichneten Pulsparametern.

Für die Höhe des Pulses, siehe Abbildung 3.6, wurde der maximal vom Funktionsgenerator erzeugbare Wert gewählt, um ein ausreichend großes laterales E-Feld für die Charakterisierung dieser Halbleiter niedriger Mobilität zu erhalten. Des Weiteren wurden die Länge und die Periode des Rechteckpulses so festgelegt, dass zum einen der Strom durch den Transistor einen konstanten Wert

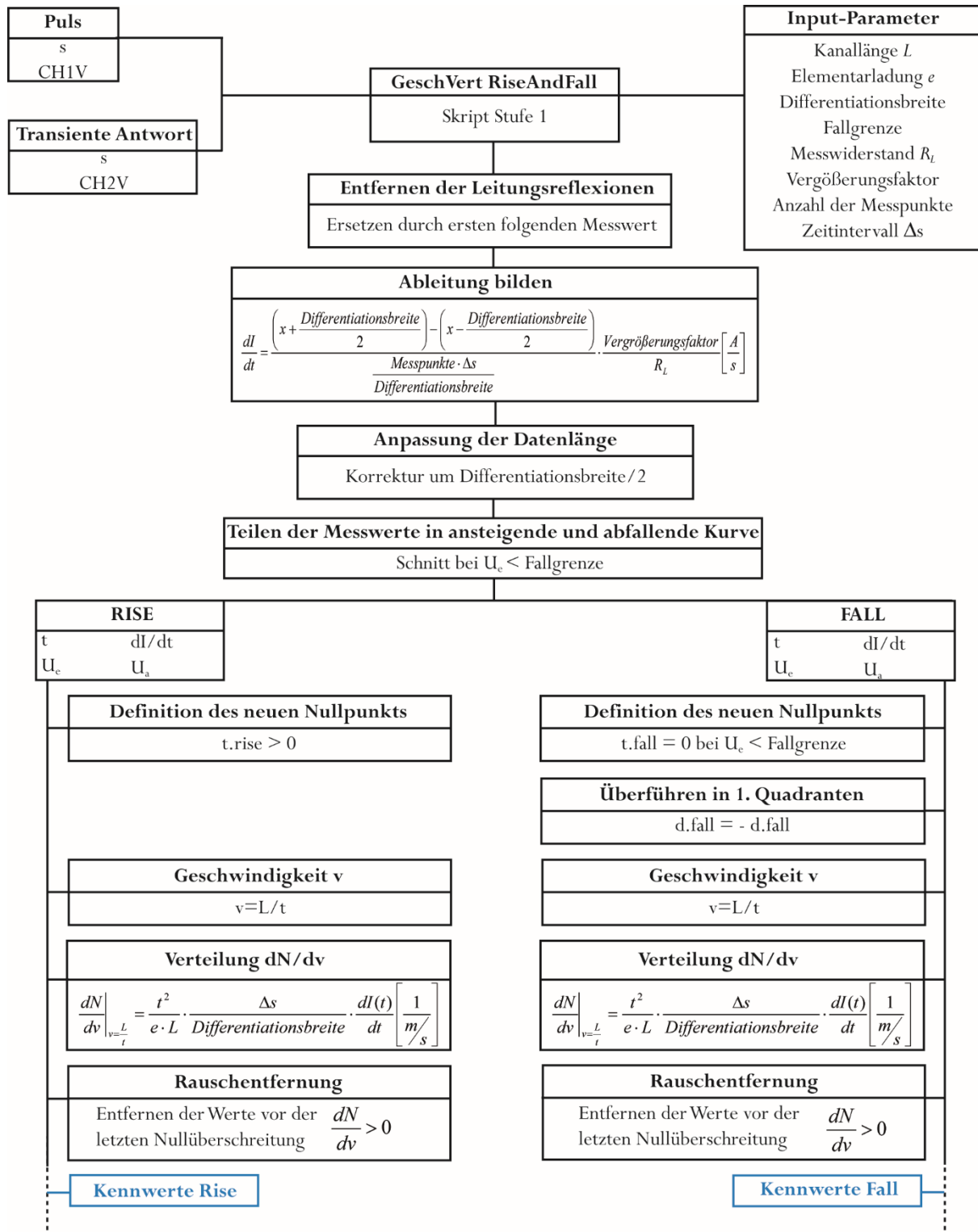
erreichen konnte bevor der Puls endete und zum anderen so, dass im durch das Oszilloskop festgelegten Messfenster (6000 Datenpunkte) eine hinreichende Auflösung erreicht werden konnte, siehe ebenfalls Abbildung 3.6. Die Frequenz der sich wiederholenden Rechteckpulse wiederum musste so niedrig gewählt werden, dass der Kanal sich vollständig entladen konnte bevor der nächste Puls folgte. Dennoch bestand das Bestreben hohe Frequenzen einzusetzen um dem realen Schaltverhalten möglichst nahe zu kommen. Für den Gesamtaufbau ergaben sich somit folgende Einstellungen:

Tabelle 3.4: Parameter der eTOF-Messungen für den Halbleiter PIF8-TAA und den Halbleiter SP400.

Parameter	Einstellungen PIF8-TAA	Einstellungen SP400
Gate-Spannung V_{gs}	-10 V	0V
Messwiderstand R_L	27 k Ω	10 k Ω
Anstiegszeit	100 ns	100 ns
Pulshöhe	10 V	10 V
Pulslänge	300 μ s	300 μ s
Pulsperiode	10 ms	10 ms
Messfenster (6000 Datenpunkte)	50 μ s	50 μ s
Pulsfrequenz	100 Hz	100 Hz

3.2.2.2 Auswertung der eTOF-Messungen

Die Auswertung der in der eTOF-Messung ermittelten Daten erfolgte mit Hilfe mehrerer Skripte in der Software MATLAB® Version 2016a der Fa. MathWorks. Da es das Ziel dieser Messungen war, Transistoren verschiedener Herstellungsarten miteinander zu vergleichen, mussten die Daten zunächst in eine entsprechend vergleichbare Form gebracht werden. Die Erzeugung dieser Datensätze wurde dreistufig vorgenommen. Zunächst wurden die Messdaten jedes einzelnen Transistors separat ausgewertet (Stufe 1, Skript *RiseAndFall*). Basierend auf den Ergebnissen der statischen Messungen und den in Stufe 1 erhaltenen Daten wurden vier identisch hergestellte Transistoren gleicher Geometrie, d.h. gleicher Kanallänge und -weite, ausgewählt und deren Messdaten gemittelt. Die gemittelten Messdaten durchliefen eine zu Stufe 1 analoge Auswertung (Stufe 2, Skript *Mittelwertbildung*). Auf der letzten Stufe wurden die gemittelten Werte verschieden hergestellter Transistoren verglichen (Stufe 3, Skript *Vergleichsauswertung*). Im Folgenden werden die den drei Stufen entsprechenden MATLAB®-Skripte mit Hilfe schematischer Darstellungen erläutert. Der Programm-Code ist Anhang A.4 zu entnehmen.

Abbildung 3.7: Schematische Darstellung von Skript der Stufe 1: *GeschVert RiseAndFall*.

Zunächst wurden die Ausgabedaten des Oszilloskops eingelesen. Diese sind die Zeitskalen und Signale der beiden Kanäle: des Rechteckpulses (s, CH1V) und der transienten Antwort des Transistors (s, CH2V). Vom Nutzer ist außerdem eine Reihe von fixen Input-Parametern vorzugeben.

Diese sind:

- die Kanallänge des Transistors L ,
- die Elementarladung e ,
- der zur numerischen Differentiation notwendige Umfang an Messwerten, aus denen die Steigung pro Punkt ermittelt wird (*Differentiationsbreite*),
- eine Spannungsgrenze, die vorgibt ab welcher Spannung der Puls beendet ist (*Fallgrenze*),
- die Größe des Messwiderstandes R_L ,
- ein Multiplikator, mit dem das differenzierte Signal verstärkt wird (*Vergrößerungsfaktor*),
- die Anzahl an Messpunkten des Messfensters und
- die Größe des Zeitintervalls eines Messpunkts Δs .

Zunächst wurden die Leitungsreflexionen aus den Rohdaten der transienten Antwort entfernt (*Entfernen der Leitungsreflexionen*). Da diese immer dem gleichen Verlauf folgen, siehe Abbildung 3.8, wurde jeweils für den Beginn und das Ende des Pulses der niedrigste bzw. höchste Wert der Reflexion ermittelt und die Werte in seiner Umgebung (zwei Werte zeitlich vorab des Minimums und drei zeitlich folgend des Maximums⁹) durch den nächsten auf die Reflexion folgenden Messwert ersetzt. Die Leitungsreflexionen werden üblicherweise drei Messintervalle ($0,3 \mu s$) nach Start des Rechteckpulses verzeichnet und dauern 7 Messintervalle ($0,7 \mu s$) an. Innerhalb der ersten Mikrosekunde nach Start des Rechteckpulses, kann das Verhalten des Transistors somit nicht beobachtet werden.

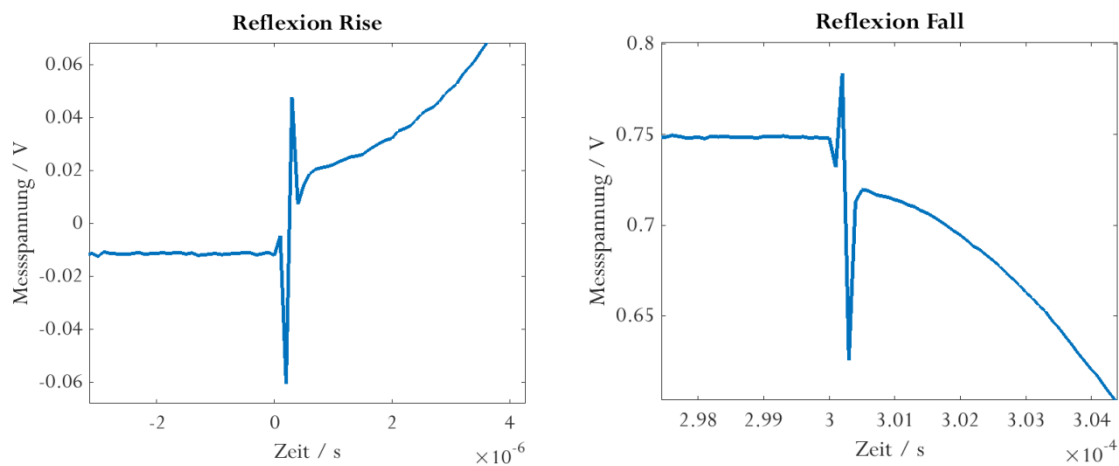


Abbildung 3.8: Leitungsreflexionen der ansteigenden Flanke *Rise* und abfallenden Flanke *Fall*. Diese überlagern z.T. das Messsignal und werden ersetzt.

⁹ Der Umfang der ersetzten Werte wird anhand der jeweiligen Werte mit Hilfe einer for-Schleife ermittelt. Als Grenze dienen Werte kleiner Null für *Rise* sowie Werte größer 90 % des Sättigungsstroms.

Im Folgenden wurde die transiente Antwort CH2V numerisch differenziert und mit Hilfe des Messwiderstandes R_L auf den geflossenen Strom rückgerechnet (*Ableitung bilden*). Die Differenzierung erfolgte durch Bestimmung der Steigung an jedem Punkt der transienten Antwort im Bereich der vorherigen und nachfolgenden 60 Werte. Hierdurch ergab sich ein scheinbarer zeitlicher Offset gegenüber den ursprünglich eingelesenen Daten. Dieser musste im Folgenden korrigiert werden (*Anpassung der Datenlänge*). Im Anschluss wurden die Messdaten in den Bereich der ansteigenden Flanke des Pulses und den der abfallenden Flanke des Pulses - fortan *Rise* und *Fall* genannt - geteilt. Die ermittelten Daten wurden nun in für *Rise* und *Fall* getrennten Variablen als Zeit t , Rechteckpuls U_e , transiente Antwort U_a und Ableitung der transienten Antwort dI/dt verwertet. Die Auswertung erfolgte für beide Bereiche analog.

Zunächst wurde der zeitliche Nullpunkt der Messung festgelegt (*Definition des neuen Nullpunkts*). Dieser ergab sich für *Rise* aus dem Zeitpunkt des Anstiegs des Rechteckpulses und für *Fall* aus dem Zeitpunkt, zu dem der vordefinierte Spannungsgrenzwert *Fallgrenze* durch die Pulsspannung unterschritten wurde. Zur einheitlichen Darstellung wurden die differenzierten Werte von *Fall* im Anschluss durch Multiplikation mit -1 in den ersten Quadranten überführt. Zur Berechnung der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung wurde das Zeitsignal nun in eine Geschwindigkeit umgerechnet (*Geschwindigkeit v*). Dies erfolgte unter der Annahme, dass die Ladungsträger in der Zeit t die Strecke L , die Länge des Transistorkanals, zurückgelegt hätten. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der Ladungsträgerlaufzeit lediglich um eine anschauliche Darstellungsweise der Signalausbreitung handelt, siehe Abschnitt 3.1.1. Zur Beschreibung der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung – sprich der Verteilung der Anzahl an Ladungsträgern in einem bestimmten Geschwindigkeitsintervall – wurde Gleichung 3.25 herangezogen (*Verteilung dN/dv*). Diese ergibt sich, wie in Radkhah¹⁰ (2015) bereits angerissen, aus folgender Herleitung nach Sauer (2015):

Der an Drain ankommende Strom setzt sich zusammen aus der Ladung pro Ladungsträger $\left(\frac{\partial I_v(t)}{\partial N}\right)$, die die Geschwindigkeit v besitzen, und der Anzahl an Ladungsträgern mit eben dieser Geschwindigkeit $\left(\frac{\partial N}{\partial v}\right)$:

¹⁰ Ramtin Radkhah hat diese Herleitung bereits in seiner von mir betreuten Bachelor-Thesis in gekürzter Form aufgeführt.

$$I(t) = \int_0^{\infty} \frac{\partial I_v(t)}{\partial N} \cdot \frac{\partial N}{\partial v} dv \quad \text{Gleichung 3.15}$$

Der erste Integrand $\frac{\partial I_v(t)}{\partial N}$ wird nun durch die im Aufbau messbaren Größen Zeitpunkt t , Startpunkt des Spannungsanstiegs t_0 und die fixe Kanallänge L ausgedrückt. Transferiert auf die vereinfachte Annahme, dass es sich bei dem gemessenen zeitabhängigen Strom um Laufzeiten von Ladungsträgern entlang des Transistorkanals handelt, stehen die Variablen für den Zeitpunkt t , an dem die zum Zeitpunkt t_0 gestarteten Ladungsträger die Strecke L mit einer Geschwindigkeit von v passiert haben. Dieser Zusammenhang lässt sich mit Hilfe der δ -Funktion ausdrücken:

$$\frac{\partial I_v(t)}{\partial N} = I_0 \int_0^{\infty} \delta\left(t - t_0 - \frac{L}{v}\right) dt_0 \quad \text{Gleichung 3.16}$$

Die Konstante I_0 steht in diesem Fall für den Strom, den ein Ladungsträger an Drain verursacht. Mit $\delta(f(x)) = \frac{\delta(x - x_0)}{|f'(x)|}$, wobei x_0 eine einfache Nullstelle von f ist und f' die Ableitung von $f(x)$ nach x , und

$$v_n = \frac{L}{t - t_0} \text{ ergibt sich}$$

$$\frac{\partial I_v(t)}{\partial N} = I_0 \cdot \frac{v^2}{L} \int_0^{\infty} \delta\left(v - \frac{L}{t - t_0}\right) dt_0 \quad \text{Gleichung 3.17}$$

Setzt man dies nun in Gleichung 3.15 ein, erhält man ein Doppelintegral der Geschwindigkeit und Zeit:

$$I(t) = \frac{I_0}{L} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} v^2 \cdot \delta\left(v - \frac{L}{t - t_0}\right) \cdot \frac{\partial N}{\partial v} dv dt_0 \quad \text{Gleichung 3.18}$$

Durch Integration des Geschwindigkeits-Integrals mit Hilfe von $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \delta(x - a) dx = f(a)$ und $a = \frac{L}{t - t_0}$

erhält man:

$$I(t) = \frac{I_0}{L} \int_0^\infty \frac{L^2}{(t-t_0)} \cdot \frac{\partial N}{\partial v} \Big|_{v=\frac{L}{t-t_0}} dt_0 \quad \text{Gleichung 3.19}$$

Im Folgenden wird die Integration durch Einsetzen der Laufzeit τ vereinfacht. Aus $\tau = t - t_0$ ergibt sich für die Integration und deren Grenzen:

$$\begin{aligned} d\tau &= -dt_0 \\ t_0 = 0 &\rightarrow \tau = t \\ t_0 = \infty &\rightarrow \tau = -\infty \end{aligned}$$

Der zeitabhängige Strom wird somit:

$$I(t) = \frac{I_0}{L} \int_t^{-\infty} \frac{L^2}{\tau^2} \cdot \frac{\partial N}{\partial v} \Big|_{v=\frac{L}{\tau}} (-d\tau) = \frac{I_0}{L} \int_{-\infty}^t \frac{L^2}{\tau^2} \cdot \frac{\partial N}{\partial v} \Big|_{v=\frac{L}{\tau}} d\tau \quad \text{Gleichung 3.20}$$

Die Integration kann jetzt durch Anwenden eines Tricks umgangen werden: Wird nach der Zeit differenziert, entspricht die Ableitung des Integranden dem Integranden, da dieser keinen zeitabhängigen Term enthält. Die Zeit ist ausschließlich Teil der Integralgrenze. Der Integrand muss nun zur Zeit τ betrachtet werden:

$$\Rightarrow \frac{dI(t)}{dt} = \frac{I_0}{L} \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t \frac{L^2}{\tau^2} \cdot \frac{\partial N}{\partial v} \Big|_{v=\frac{L}{\tau}} d\tau = I_0 \cdot \frac{L}{t^2} \cdot \frac{\partial N}{\partial v} \Big|_{v=\frac{L}{t}} \quad \text{Gleichung 3.21}$$

In dem hier vorgestellten Messaufbau wird ein Rechteckpuls verwendet, d.h. Ladungsträger werden nicht einmalig in den Kanal injiziert und deren Ankunftszeit an Drain gemessen, sondern sie werden permanent „nachgepumpt“. Im Idealfall würde man diese Messungen mit einem Nadelpuls – der einer einmaligen Injektion entsprechen würde – durchführen. Da dies aufgrund von Messartefakten wie z.B. Impulsreflexionen nicht möglich ist, hilft an dieser Stelle eine mathematische Lösung. Durch Differenzieren des ankommenden Stroms ist es möglich nur die Ladungsträger bestimmter Zeitintervalle zu betrachten:

$$\frac{dI(t)}{dt} = I_0 \cdot \frac{L}{t^2} \cdot \frac{\partial N}{\partial v} \bigg|_{v=\frac{L}{t}} \quad \text{Gleichung 3.22}$$

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Zeit t nun mit t^2 in die Gleichung eingeht. Für sehr kleine t wird das Digitalisierungsrauschen hierdurch maßgeblich verstärkt. Die Konstante I_0 wird nun mit Hilfe der Elementarladung, welche der Ladung eines Ladungsträgers entspricht, ausgedrückt. Erreicht ein Ladungsträger (Elektron/Loch) die Drain-Elektrode, so wird dieser in einem Zeitintervall des Messbereiches detektiert. Es ergibt sich also ein Strom aus dem Quotienten der Elementarladung e (Einheit: C) und der Länge des Messfensters Δs (Einheit: s). Es besteht somit eine Abhängigkeit vom am Oszilloskop gewählten Messbereich.

$$I_0 = \frac{e}{\Delta s} \quad \text{Gleichung 3.23}$$

Durch Einsetzen von Gleichung 3.23 und Umstellen nach der Ladungsträgerdichte pro Geschwindigkeitsintervall ergibt sich Gleichung 3.24, welche die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung beschreibt:

$$\frac{\partial N}{\partial v} \bigg|_{v=\frac{L}{t}} = \frac{t^2}{e \cdot L} \cdot \Delta s \frac{dI(t)}{dt} \frac{1}{\frac{m}{s}} \quad \text{Gleichung 3.24}$$

Für die in dieser Arbeit durchgeführte Auswertung muss Gleichung 3.24 noch um den Vergrößerungsfaktor bereinigt werden. Es ergibt sich somit:

$$\frac{\partial N}{\partial v} \bigg|_{v=\frac{L}{t}} = \frac{t^2}{e \cdot L} \cdot \frac{\Delta s}{\text{Vergrößerungsfaktor}} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \frac{1}{\frac{m}{s}} \quad \text{Gleichung 3.25}$$

Die erhaltene Geschwindigkeitsverteilung wurde anschließend bezüglich der Anzahl an Ladungsträgern auf 1 normiert. Dies dient der Vergleichbarkeit der Form der Verteilung sowie dem Vergleich der Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum. Außerdem wird der Bereich ermittelt, in dem die Daten aufgrund des Digitalisierungsrauschens nicht verwertbar sind. Dieser, bei niedrigen Geschwindigkeiten, d.h. großen Messzeiten, auftretende, Bereich wurde aus der Menge, der zur Auswertung genutzten Daten entfernt (*Rauschentfernung*). Der Zeitpunkt, ab dem die Messkurve vollständig im ersten Quadranten verläuft, wird ermittelt und alle Werte davor gleich null gesetzt. Abbildung 3.9 zeigt eine Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung mit und ohne Rauschentfernung.

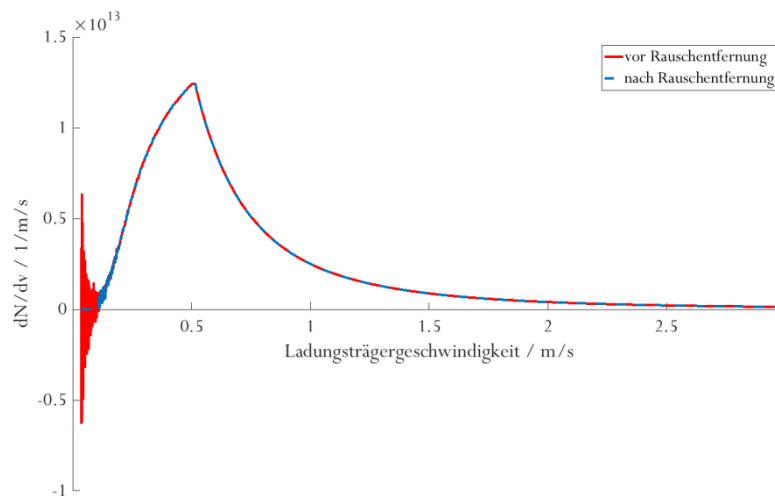


Abbildung 3.9: Darstellung der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung als Plot der Anzahl an Ladungsträgern pro Geschwindigkeitsintervall über der Geschwindigkeit am Beispiel des Transistors 0451#24, für die Nomenklatur siehe Abschnitt 4.1. In rot dargestellt ist die Verteilung vor Rauschentfernung, in blau nach Rauschentfernung. Es ist anzumerken, dass die Verteilung hier noch den Vergrößerungsfaktor (20.000) enthält.

Um die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen der verschiedenen hergestellten Transistoren nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ unterscheiden zu können, wird eine Reihe von eigens definierten Kennwerten ermittelt und zum Vergleich herangezogen, siehe Abbildung 3.10.

Diese sind:

- *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$: $v_{\text{Vert-max}}$ gibt die Geschwindigkeit an, welche die meisten Ladungsträger im Transistor aufweisen.
- *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsanfang* $v_{\text{Vert-start}}$: Dieser Wert gibt an, ab welcher Geschwindigkeit die Ladungsträgerverteilung einen Grenzwert von 10^5 bei *Rise* und 10^4 bei *Fall* unterschritten hat. 10^5 bzw. 10^4 wurde aus Erfahrung als Grenze gewählt, da ab diesem Wert in allen Messungen ein kontinuierlicher Anstieg des Stroms – und somit der Anzahl an Ladungsträgern – verzeichnet werden konnte.
- *Verteilungsbreite* B_{25} , B_{50} , B_{75} : Es wurde die Breite der normierten Verteilung bei 25, 50 und 75 % des Maximums (1 aufgrund der Normierung) ermittelt. Als Hauptbewertungskriterium dieser Kategorie wurde die Breite bei 50 %, auch *Halbwertsbreite* B_{50} genannt, genutzt.
- *Form der Verteilung (Tailing/Fronting)*: Zur Beschreibung der Form der Verteilung wurden hier Begriffe aus der klassischen Chromatographie adaptiert. Das Tailing bzw. Fronting beschreiben die Verzerrung eines sonst gaußförmigen Peaks nach vorne (Fronting) oder nach hinten (Tailing, Schwanzbildung) hin. Hier wurde die Differenz der Breitewerte in m/s der Verteilung bei 25, 50 und 75% in Bezug auf die Ladungsträgergeschwindigkeit

am Verteilungsmaximum berechnet, d.h. zur Berechnung des Tailings bei 50 % wurde die erste Geschwindigkeit, bei der die Verteilung 50 % ihrer Höhe überschreitet, von der Ladungsträgergeschwindigkeit am Ladungsträgermaximum abgezogen. Somit konnte die „Breite“ der linken Verteilungshälfte (Tailing) bestimmt werden.

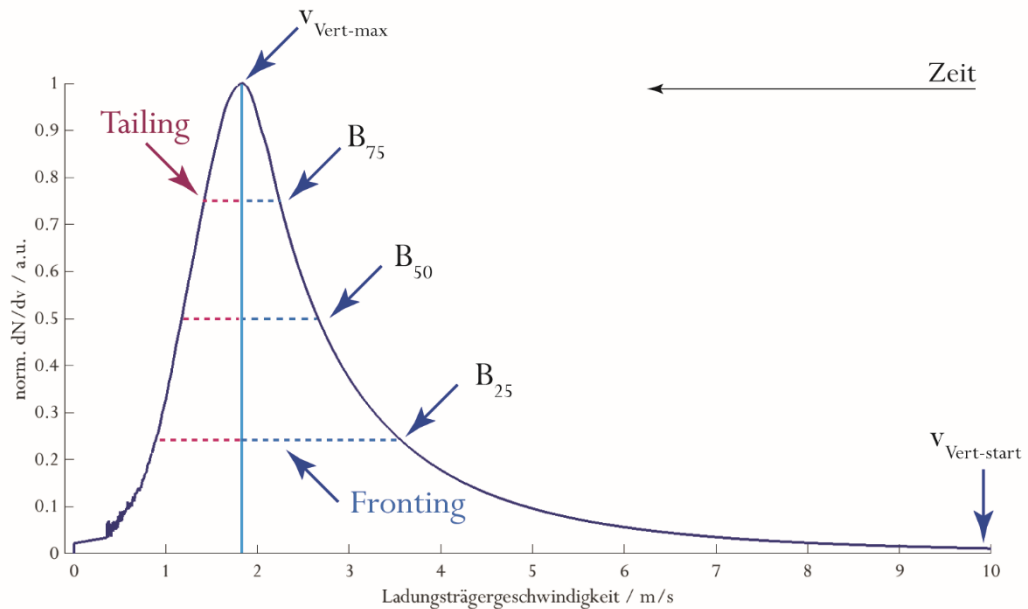


Abbildung 3.10: Kennwerte einer Verteilungskurve am Beispiel von Transistor 0360#22.

Ein Tailing bzw. Fronting ergibt sich nun daraus, welcher Wert den größeren Anteil (angegeben in %) an der Verteilungsbreite stellt. Zu beachten ist, dass die Plots über die Geschwindigkeit – und nicht über die Zeit – erfolgen, siehe Abbildung 3.10. Somit beschreibt eine Verzerrung zu höheren Geschwindigkeiten ein Fronting – diese Ladungsträger wurde nach kürzerer Zeit detektiert – und eine Verzerrung zu langsameren Geschwindigkeiten – diese Ladungsträger wurden zu einem späteren Zeitpunkt detektiert – infolgedessen ein Tailing.

- *Anzahl der Ladungsträger N_{LT}* : Durch Integration der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung über die Geschwindigkeit wurde die Anzahl an transportierten Ladungsträgern ermittelt.
- *Transitzeit t_{tr}* : Die Transitzeit in einer TOF-Messung ist definiert als die Zeit, die zwischen dem Start des Spannungspulses und den ersten Änderungen des Stroms an Drain vergeht, siehe auch Abschnitt 3.1.3. Analog zu Dunn et al. (2009) und Basu et al. (2007), siehe Abschnitt 3.1.4.1, wurde der Zeitpunkt gewählt, an dem das Spannungsantwortsignal 50 % seines Maximalwertes bereinigt um den Verschiebungsstrom – bezogen auf den Zeitpunkt, an dem das Eingangssignal 50 % seines Maximalwertes beträgt – erreicht hat.

Die bearbeiteten Messdaten (in Form eines MATLAB®-Workspaces), Kennwerte (in Form einer Excel-Tabelle) und Diagramme (in Form von Bilddateien) wurden abschließend zur Weiterverwendung gespeichert. Schematisch ist der Ablauf der Ermittlung der Kennwerte in Abbildung 3.11 dargestellt.

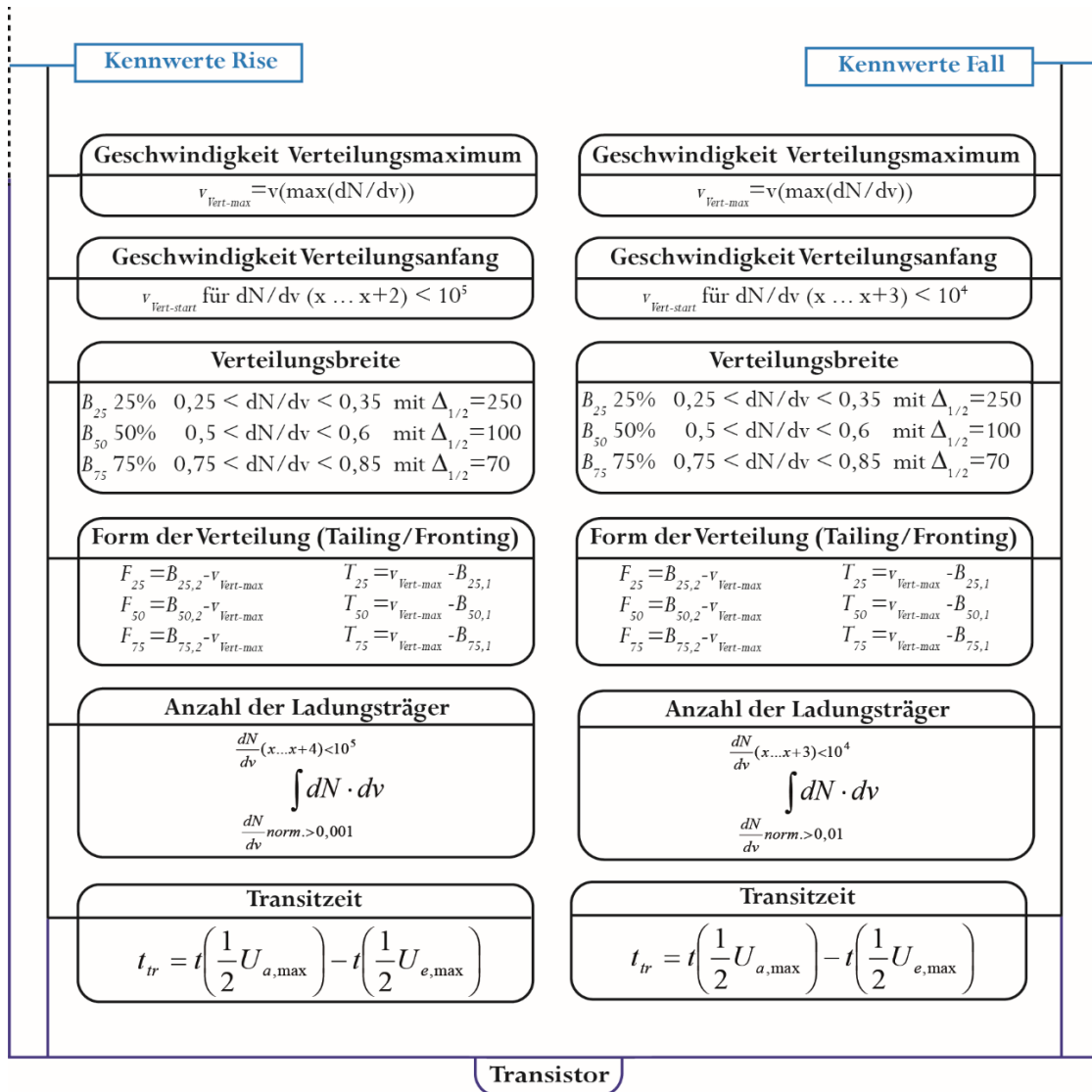


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Kennwertextraktion (Skript der Stufe 1: GeschVert RiseAndFall) für den Halbleiter PIF8-TAA. Die Extraktion der Kennwerte für SP400 erfolgt analog mit Ausnahme der Deltawerte zur Ermittlung der Verteilungsbreite. Diese belaufen sich auf $\Delta_{1/2}(75\%) = 100$, $\Delta_{1/2}(50\%) = 50$ und $\Delta_{1/2}(25\%) = 30$.

Auf der zweiten Stufe erfolgte nun die Mittelwertbildung aus je 4 identisch hergestellten Transistoren mit identischer Geometrie. Die Auswahl dieser Transistoren erfolgte anhand ihrer statisch ermittelten Kennwerte und Kennlinien sowie anhand der Ergebnisse aus dem Skript der Stufe 1 RiseAndFall, siehe

Abbildung 3.7 und Abbildung 3.11. Die statisch ermittelte Mobilität sowie die Schwellspannung der 4 ausgewählten Transistoren sind für alle verwendeten Substrate in Anhang A.1 aufgeführt.

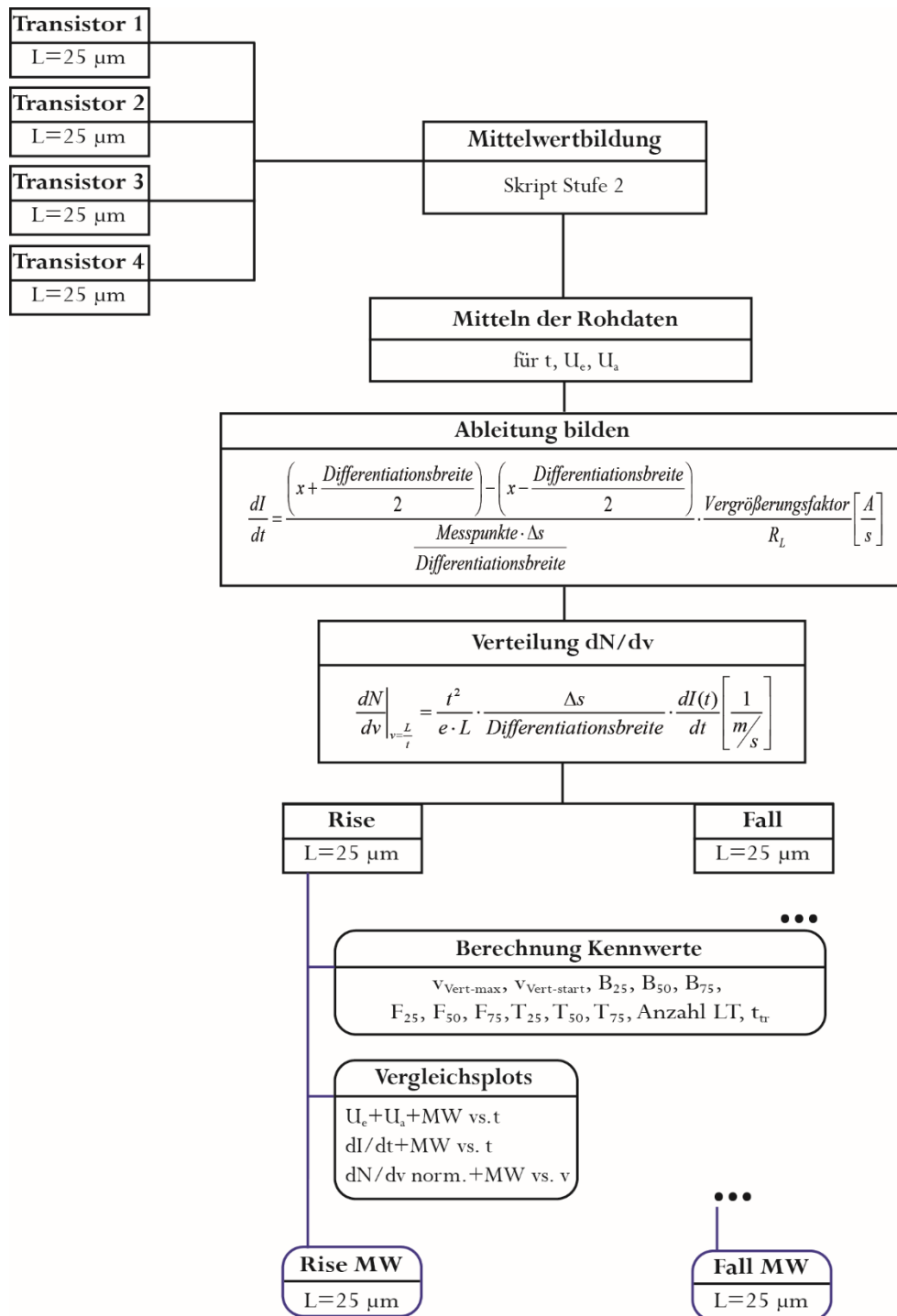








Abbildung 3.12: Schematische Darstellung des Skripts Mittelwertbildung am Beispiel der 25 µm-Transistoren eines Schaltungssubstrats mit Layout 3. Die Berechnungen für Transistoren mit 10 µm Kanallänge erfolgte analog.

Das für die Mittelwertbildung verwendete Skript (*Mittelwertbildung*) wird schematisch in Abbildung 3.12 vorgestellt. Nach Einlesen der im vorherigen Skript erstellten Workspaces für jeden Transistor erfolgte unmittelbar die Mittelung der Messdaten. Es ist anzumerken, dass diese Messdaten bereits in einer um die Reflexionen bereinigten Form aus Skript *RiseAndFall* vorlagen. Im Anschluss durchliefen die gemittelten Daten alle Schritte des ersten Skripts, d.h. die gemittelte transiente Antwort wurde identisch zu den einzelnen Transistoren ausgewertet. Abschließend wurden die gemittelten Daten vergleichend mit den Daten der einzelnen Transistoren geplottet bzw. die Kennwerte tabellarisch gegenübergestellt. Die berechneten Daten sowie die Plots und Kennwerttabellen wurden in entsprechender Form (Daten: MATLAB®-Workspaces; Diagramme: Bilddateien; Kennwerttabellen: Excel-Datei) abgespeichert. Da auf jedem hergestellten Substrat Transistoren mit 10 und 25 μm Kanallänge und identischer Kanalweite vorlagen, wurden zwei getrennte Datensätze für die beiden Kanallängen erstellt. Man erhielt so pro Herstellungsprozess zwei separat zu bewertende Datensätze für Transistoren unterschiedlicher Kanallänge.

Auf der dritten und letzten Stufe wurden die in *Mittelwertbildung* gebildeten Datensätze im Skript *Vergleichsauswertung* zum Vergleich zwischen verschiedenen hergestellten Transistoren herangezogen. Dies geschah zum einen qualitativ durch Bewertung der Plots sowie quantitativ durch die Bewertung der Kennwerte. Die Bewertung der Kennwerte erfolgte, wenn nicht im Einzelnen in den Abschnitten des Kapitels 5 dargestellt, anhand von sogenannten Trendtabellen. Diese zeigen für eine bestimmte Versuchsreihe, z.B. die Erhöhung der Druckgeschwindigkeit, wie ein Kennwert sich ändert. Symbolisiert wird das wie folgt:

Tabelle 3.5: Zuordnung der Symbole in den Trendtabellen der Kennwerte.

Aussage	Symbol
nimmt zu	
bleibt gleich	
nimmt ab	
Trend folgt nicht 100 %-ig	
kein Trend erkennbar	
Fehler in Parameterextraktion	

Aus den ermittelten Transitzeiten t_{tr} und den Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum $v_{vert-max}$ wurden die dynamischen Mobilitäten nach Gleichung 3.5 für den Halbleiter SP400 und Gleichung 3.6 für den Halbleiter PIF8-TAA berechnet, siehe Abschnitt 4.2.2. Für die Berechnung aus der Transitzeit t_{tr} ergibt sich die Mobilität der höchstenergetischen Ladungsträger

während der Kanalausbildung (Dunn, 2010). Für die Berechnung aus der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ ergibt sich die Mobilität der häufigsten Ladungsträger.

Die zugehörige Fehlerabschätzung geschah anhand der Berechnung des Größtfehlers nach:

$$\Delta\mu_{dyn,SP400} = 0,38 \cdot \sqrt{\left(\frac{2L}{t_{tr}(V_{gs}-V_t)} \cdot \Delta L\right)^2 + \left(\frac{L^2}{t_{tr}^2(V_{gs}-V_t)} \cdot \Delta t_{tr}\right)^2 + \left(\frac{L^2}{t_{tr}(V_{gs}-V_t)^2} \cdot \Delta V_{gs}\right)^2 + \left(\frac{L^2}{t_{tr}(V_{gs}-V_t)^2} \cdot \Delta V_t\right)^2}$$

Gleichung 3.26

$$\Delta\mu_{dyn,PIF8-TAA} = 0,38 \cdot \sqrt{\left(\frac{2L}{t_{tr} \cdot V_{ds}} \cdot \Delta L\right)^2 + \left(\frac{L^2}{t_{tr}^2 \cdot V_{ds}} \cdot \Delta t_{tr}\right)^2 + \left(\frac{L^2}{t_{tr} V_{ds}^2} \cdot \Delta V_{ds}\right)^2}$$

Gleichung 3.27

Mit den angenommenen Fehlern:

$$\Delta L = 0,5 \mu m$$

$$\Delta t_{tr} = 0,1 \mu s$$

$$\Delta V_{gs} = 0,1 V$$

$$\Delta V_t = \sigma(V_t)$$

wobei 0,5 μm Fehler bei der Kanallänge ΔL als Ungenauigkeit in der Elektrodenherstellung abgeschätzt werden, 0,1 μs als Fehler der Transitzeit Δt_{tr} dem fehlerhaften Extrahieren um einen Messwert sowie 0,1 V der Anzeigenauigkeit der Gleichspannungsquelle als Fehler der Gate-Spannung ΔV_{gs} entsprechen. Der Fehler der Schwellspannung ΔV_t ergibt sich aus der Standardabweichung des Mittelwerts der statische ermittelten Schwellspannung der verwendeten Transistoren.

Den dynamischen Mobilitäten wird die *statische Mobilität* gegenübergestellt. Sie ist ein Maß für die durchschnittliche Mobilität aller Ladungsträger in einem ausgebildeten Kanal (Dunn, 2010). Im Rahmen dieser Arbeit wird sie aus der Transferkennlinie bei 40 V Gate-Spannung extrahiert, siehe Abschnitt 3.2.1. Statische Messungen beruhen im Gegensatz zu dynamischen Messungen auf Gleichspannungsverhältnissen (Felderhoff, 2007).

Für ausgewählte Versuchsreihen wurde zusätzlich eine Abweichungsanalyse durchgeführt, die anhand eines Kennwert- und Kurvenvergleichs die Signifikanz einer Abweichung aufzeigen soll. Die Ermittlung der Abweichung der Kennwerte erfolgte nach folgender Methode: Die Kennwerte der minimalen und maximalen Abweichung vom Mittelwert wurden festgestellt und deren prozentuale Abweichung von selbigem bestimmt (fortan *Minimum-* und *Maximumtoleranz* genannt). Eine Abweichung

des Kennwerts gilt als signifikant, wenn sie oberhalb oder unterhalb der maximalen oder minimalen Abweichung vom Mittelwert liegt.

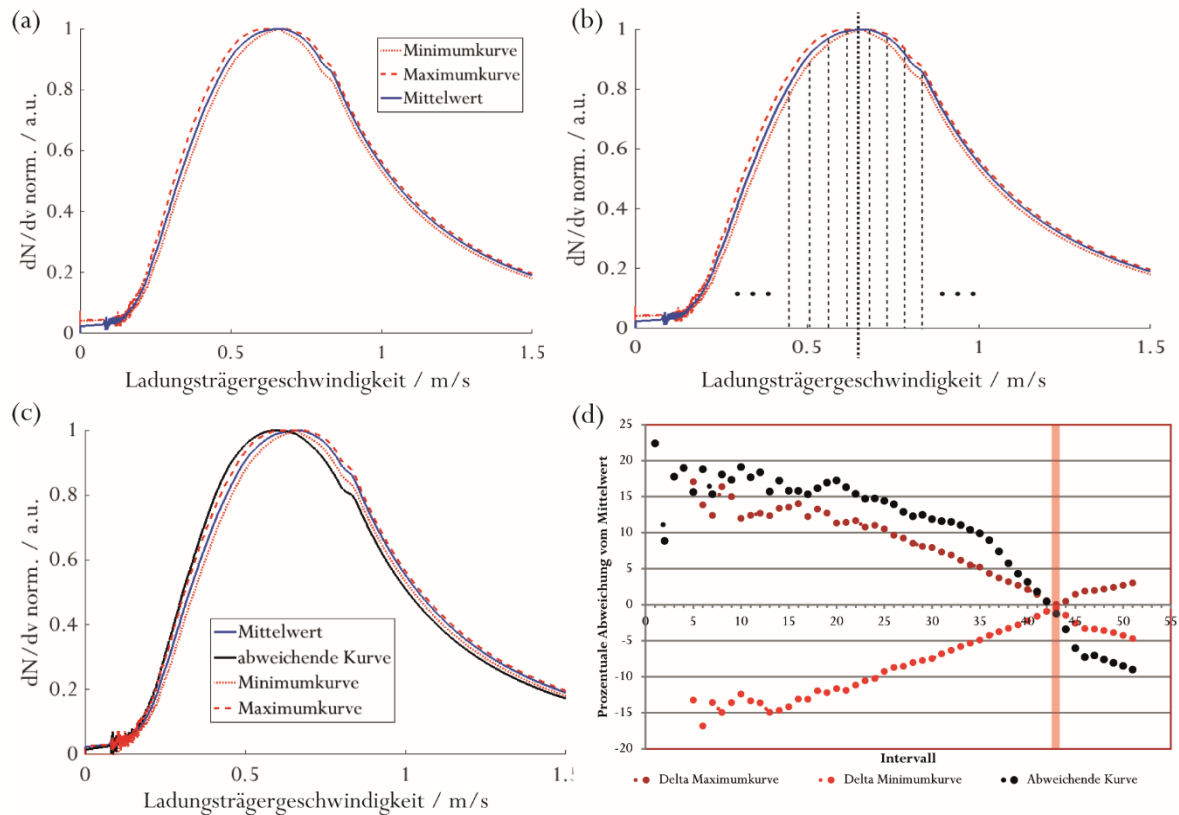


Abbildung 3.13: Vorgehen bei der Abweichungsanalyse am Beispiel der Substrate 0446 dargestellt in blau („Mittelwert“, PIF8-TAA 2500 rpm) und 0450 dargestellt in schwarz („abweichende Kurve“, PIF8-TAA 4500 rpm), für die Substratnomenklatur siehe Abschnitt 4.1: (a) Mittelwertkurve mit den ermittelten Minimum- (gepunktet) und Maximumkurven (gestrichelt). Diese ergeben sich aus den am größten vom Mittelwert abweichenden Einzelverteilungen; (b) ausgehend vom Verteilungsmaximum werden Intervalle mit je 10 Messwerten gebildet; (c) eine abweichende Verteilung kann wie in diesem Beispiel teilweise oberhalb und teilweise unterhalb der Referenzverteilung (Mittelwert) liegen; (d) die prozentuale Abweichung von der Mittelwertreferenz der in (c) gebildeten Intervalle wird gemittelt und über die Nummer des Intervalls geplottet. Es ist zu erkennen, dass die abweichende Kurve (schwarz) jeweils oberhalb der Maximumkurve oder unterhalb der Minimumkurve liegt. Die Abweichung ist somit signifikant.

Für die Ermittlung der Abweichungen der Kurven wurden zunächst die Verteilungen mit der maximalen und minimalen Abweichung von einer ihrer zugehörigen gemittelten Verteilung bestimmt, siehe Abbildung 3.13 (a). Aus dem normierten *Fall*-Plot der Mittelwertbildung wurden bei 0,8 die beiden Kurven ermittelt, die in positive (maximale Abweichung) und negative Richtung (minimale Abweichung) die größte Abweichung von der Mittelwertkurve zeigten. Zunächst wurde die Differenz

der gemittelten Verteilung zu den beiden Extrema gebildet und hieraus die prozentuale Abweichung von der Mittelwertkurve bestimmt. Aus diesen beiden Kurven wurde in MATLAB® (Skript *Mittelwertbildung_ABW*) eine Minimumkurve ermittelt, d.h. eine Kurve, deren Werte immer unterhalb der Mittelwertkurve liegen, und eine Maximumkurve, die die Werte der maximalen Abweichung oberhalb der gemittelten Kurve enthält. Anschließend wurden alle Kurven in Intervalle à 10 Messwerten zusammengefasst, siehe Abbildung 3.13 (b). Diese beginnen am Verteilungsmaximum der Mittelwertkurve und gehen von dort aus zunächst 5 Schritte nach links und rechts zur Erstellung des nullten Intervalls und entstehen dann aus den jeweils 10 folgenden Werten. Jedes Intervall wurde in einem Mittelwert zusammengefasst. Die Intervallbildung erfolgte in einem Bereich, der in etwa dem der Flächenberechnung entspricht. Allerdings wird der Startwert auf das Überschreiten von 0,1 heraufgesetzt. Hieraus ergaben sich dann die Minimale und Maximale *Abweichungskurve* für einen Mittelwert. Wurde nun eine zweite Verteilung verglichen, siehe Abbildung 3.13 (c), wird deren prozentuale Abweichung von der Mittelwertkurve ebenfalls via Differenz- und Intervallbildung berechnet, siehe Abbildung 3.13 (d). Eine Abweichung gilt als signifikant, wenn mehr als 75 % der erstellten Abweichungskurve außerhalb der durch die Minimale und Maximale Abweichungskurve aufgespannten Fläche liegt. Die Abweichungskurve wird, sofern die Anzahl der Intervalle groß genug ist, für *Rise* ± 20 Intervalle ausgehend vom Maximum der Verteilung und für *Fall* 40 Intervalle im Tailingbereich und 20 Intervalle im Frontingbereich begrenzt.

4. Herstellung organischer Feldeffekttransistoren

In diesem Kapitel werden die verwendeten *Substrate* und *Materialien*, der *Referenzprozess* und die sogenannten *Basisverfahren* zur Herstellung von bottom-contact top-gate OFETs beschrieben. Begleitet wird diese von den Messvorschriften zur *rheologischen*, *oberflächenanalytischen* und *optischen* Charakterisierung. Die Herstellung der Transistoren erfolgt stets in vier Schritten: Vorbehandlung des Substrats und der Source-Drain-Elektroden, Aufbringen des Halbleiters, Aufbringen des Dielektrikums und abschließend das Aufbringen der Gate-Elektrode. Auf Abweichungen von den Basisverfahren oder abgeänderte Parameter wird in den entsprechenden Abschnitten in Kapitel 5 hingewiesen. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass alle in den Referenz- und Basisverfahren ausgewählten Parameter auf den Erfahrungen und Ergebnissen der zahlreichen Versuche im Rahmen des Projekts POLYTOS II beruhen (POLYTOS, 2013). Bis zur Fertigstellung dieser Arbeit wurden insgesamt 15.282 Transistoren auf 566 Substraten - des im Folgenden vorgestellten Typs *Schaltungssubstrat* – hergestellt, charakterisiert und analysiert.

4.1 Schaltungssubstrat

Es wurde ein vorstrukturiertes Substrat verwendet, das sogenannte Schaltungssubstrat Layout 3 der Fa. PolyIC GmbH & Co. KG (POLYTOS, 2013), siehe Abbildung 4.1 (a). Diese 50 µm dicken Polyethylenterephthalatfolien (kurz PET) enthalten Source-Drain-Strukturen aus Silber, welche in 3 Reihen mit jeweils 9 Transistoren angeordnet sind, siehe Abbildung 4.1 (b). Die Transistorbenennung sowie Kanallängen und -weiten sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Die Transistoren werden stets nach folgendem Schema benannt „Substratnummer#ZeileSpalte“. 0451#24 beschreibt beispielsweise den Transistor der zweiten Zeile in Spalte 4 des Substrats 0451. Der ebenfalls verwendete Begriff „Probe 0451“ beschreibt das Substrat mit der Nummer 0451 und steht für einen charakteristischen Herstellungsprozess. Dieser wird meist in der Fußnote angegeben. Insgesamt existieren 4 verschiedene Layouts, die sich in den Kanallängen und -weiten unterscheiden. Diese sind in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet für Mikroelektronische Systeme der TU Darmstadt und dem Institut für Entwurf Integrierte Schaltkreise der Hochschule Mannheim im Spitzenclusterprojekt POLYTOS entstanden. Weitere Details sind Hengen (2015) zu entnehmen.

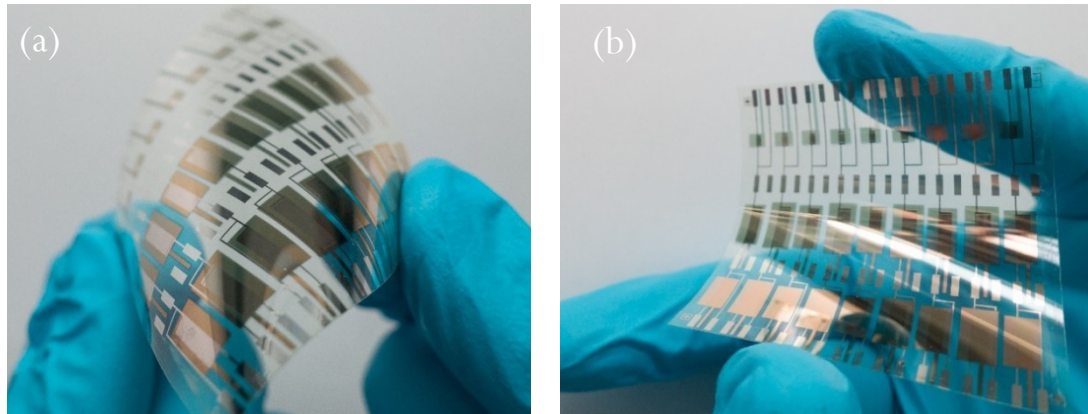


Abbildung 4.1: Fotoaufnahmen der Transistoren auf dem Schaltungssubstrat³. Eine Rückansicht (a). In Silber erkenntlich die Source-Drain-Elektroden. Der transparente Halbleiter sowie das transparente Dielektrikum sind vor dem Hintergrund der goldenen Gate-Elektrode in dieser Darstellung nicht zu erkennen. Eine Draufsicht (b). In Silber erkenntlich die Kontaktpads und Zuleitung der Transistoren, in Gold die Gate-Elektroden.

Die Substrate liegen als Bahn vor und wurden am jeweiligen Versuchstag in 50 x 50 mm Stücke vereinzelt. Die Oberflächenenergie des Substrates wurde nach der in Abschnitt 1.1 vorgestellten Methode für die PET-Folie zwischen den Elektroden zu $53,9 \pm 2,8$ mN/m (unter Verwendung von Wasser und Diodmethan) und für die Silberelektroden zu $53,4 \pm 1,6$ mN/m (unter Verwendung von Wasser und Diodmethan) bestimmt, siehe auch Abbildung 4.3. Es ist anzumerken, dass sich zwischen den 100 μm breiten Silberelektroden 10 bzw. 25 μm breite Lücken befinden, siehe Abbildung A.16.

Tabelle 4.1: Bezeichnung der Transistoren sowie Kanallängen und -weiten für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Substrat (Schaltungssubstrat Layout Nr. 3 der Fa. PolyIC GmbH & Co. KG).

Reihe\Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	#1.1 L = 10 μm W = 1.000 μm	#1.2 L = 25 μm W = 1.000 μm	#1.3 L = 10 μm W = 1.000 μm	#1.4 L = 25 μm W = 1.000 μm	#1.5 L = 10 μm W = 1.000 μm	#1.6 L = 25 μm W = 1.000 μm	#1.7 L = 10 μm W = 1.000 μm	#1.8 L = 25 μm W = 1.000 μm	#1.9 L = 10 μm W = 1.000 μm
2	#2.1 L = 10 μm W = 10.000 μm	#2.2 L = 25 μm W = 10.000 μm	#2.3 L = 10 μm W = 10.000 μm	#2.4 L = 25 μm W = 10.000 μm	#2.5 L = 10 μm W = 10.000 μm	#2.6 L = 25 μm W = 10.000 μm	#2.7 L = 10 μm W = 10.000 μm	#2.8 L = 25 μm W = 10.000 μm	#2.9 L = 10 μm W = 10.000 μm
3	#3.1 L = 10 μm W = 10.000 μm	#3.2 L = 25 μm W = 10.000 μm	#3.3 L = 10 μm W = 10.000 μm	#3.4 L = 25 μm W = 10.000 μm	#3.5 L = 10 μm W = 10.000 μm	#3.6 L = 25 μm W = 10.000 μm	#3.7 L = 10 μm W = 10.000 μm	#3.8 L = 25 μm W = 10.000 μm	#3.9 L = 10 μm W = 10.000 μm

Für vereinzelte Versuche (Ganz, 2013a) wurde auf ein vorstrukturiertes Polyethylennaphthalat-Substrat, kurz PEN, zurückgegriffen, welches Source-Drain-Strukturen aus Gold mit einem Haftvermittler aus Titan für insgesamt 63 Transistoren beinhaltet (Pankalla, 2013a; Spiehl, 2012).

4.2 Materialien

In dieser Arbeit wurden zwei Materialsets der Marke lisicon® der Fa. Merck KGaA verwendet. Diese stammen teilweise aus dem Spitzenclusterprojekt POLYTOS, in dessen Rahmen Verfahren und Charakteristika bereits veröffentlicht wurden (Ganz, 2013a; Ganz, 2013b; Spiehl, 2012; Hengen, 2015; Pankalla, 2014).

4.2.1 Self-assembled Monolayer

Zur Anpassung der Austrittsarbeit der verwendeten Silberelektroden wurde das Self-assembled Monolayer (kurz SAM) lisicon® M001, bezogen von der Fa. Merck KGaA, verwendet. Als fertige Lösung wird es üblicherweise durch Eintauchen (Fukuda, 2014) oder im Spin-Coating (Kang, 2014; Ganz, 2013b) appliziert. Es erhöht die Austrittsarbeit des Silbers von 3,96 eV auf 4,45 eV (Kim, 2016).

4.2.2 Halbleiter

Es wurden zwei verschiedene Halbleiter verwendet: zum einen Poly-(Indenofluoren-8-triarylamin) (kurz PIF8-TAA) (Zhang, 2009), und lisicon® SP400, beide bezogen über Fa. Merck KGaA. In beiden Fällen handelt es sich um amorphe polymere p-Halbleiter.

Bei PIF8-TAA handelt es sich um einen Copolymerhalbleiter. Er findet heutzutage hauptsächlich Einsatz als effizienzsteigerndes lochleitendes Material in Perovskitsolarzellen (Heo, 2014; Ryu, 2014). Seine Synthese und elektrischen Eigenschaften wurden erstmals durch *Zhang et al.* (2009) dokumentiert. *Zhang* konnte zeigen, dass der Einbau von Indenofluoreneinheiten via Suzuki-Polykondensation in PTAA die Mobilität unter Beibehaltung der guten Sauerstoffstabilität von PTAA enorm steigert. PIF8-TAA ist löslich in halogenhaltigen organischen Lösemitteln wie Chloroform und Chlorbenzol, aber auch in Toluol und Xylol. Ein HOMO in der Höhe von 5,5 eV konnte via Photoelektronenspektroskopie ermittelt werden. Für Massen größer 15 kDa¹¹ wird, aufgrund der hohen Kettenlänge und den dadurch entstehenden großen Abstand zwischen den Endgruppen, von einer Unabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften vom Molekulargewicht ausgegangen. In einem ersten Versuch konnten für flüssigprozessierte bottom-contact top-gate Transistoren eine Mobilität von 0,04 cm²/Vs und eine On/Off-Ratio von 10⁶ ermittelt werden. Diese Performance war über Wochen stabil. In einer weiteren Arbeit von *Pankalla et al.* (2013a) wurden Schwellspannungen zwischen -2 und -19 V dokumentiert

¹¹ Ein Dalton Da entspricht der atomaren Masseneinheit *u*.

(abgelesen aus Abbildung 4a). Diese hohen Schwankungen beruhen auf den variierten Vorbehandlungen der Elektroden (Argon bzw. Sauerstoffplasma aus verschiedenen Leistungen mit unterschiedlicher Dauer) und verschiedenen Gewichtsprozenten der verwendeten Lösung. Hengen (2015) hat Schwellspannungen zwischen -5 und -10 V ermittelt. Üblicherweise wurde in dieser Arbeit eine zwei gewichtsprozentige (wt.-%) Lösung von PIF8-TAA in reinem Mesitylen (Alfa Aesar, $\geq 98\%$) verwendet.

SP400 wurde als gebrauchsfertige Lösung bezogen und verwendet. Auch hier handelt es sich um einen amorphen polymeren Halbleiter (Grau, 2016). In diesem Fall wurden allerdings Mesitylen und 1-Methylnaphthalen als Lösemittel verwendet. Im Tiefdruck wurden Mobilitäten zwischen 0,20 und 0,42 cm^2/Vs (abgelesen aus Diagramm 4a in Grau *et al.* (2016)) sowie ein On/Off-Ratio von 10^5 (abgelesen aus der 4V-Kennlinie in Diagramm 6) dokumentiert. Schwellspannungen konnten zwischen -1 und -3 V in Abhängigkeit der Dielektrikumsschichtdicke extrahiert werden. HOMO und LUMO liegen bei -5,3 eV bzw. -2,7 eV (Wierzchowicz, 2016).

Zur Auswahl eines geeigneten Druckverfahrens sowie zur Beurteilung des Benetzungs- und Filmbildungsverhaltens, ist es notwendig, die rheologischen Eigenschaften eines Fluids zu kennen. Diese wurden nach den in Abschnitt 1.1 erläuterten Methoden ermittelt und sind für beide Halbleiter nachfolgend aufgelistet:

Tabelle 4.2: Fluidkennndaten der Halbleiter PIF8-TAA in Mesitylen sowie SP400, gemessen nach der Messvorschrift in Abschnitt 1.1.

	Viskosität mPas	Dichte g / mL	Oberflächenenergie mN / m
PIF8-TAA 2 wt.-%	$4,7 \pm 0,1$	$0,867 \pm 0,009$	$28,4 \pm 0,0$
PIF8-TAA 3 wt.-%	$9,9 \pm 0,1$	$0,872 \pm 0,015$	$28,5 \pm 0,0$
PIF8-TAA 4 wt.-%	$19,3 \pm 0,1$	$0,874 \pm 0,018$	$28,5 \pm 0,1$
SP400	$21,2 \pm 0,5$	$0,941 \pm 0,007$	$32,5 \pm 0,2$

4.2.3 Dielektrikum

Als Dielektrikum wurde die Polymerlösung lisicon® D320 verwendet. Es standen mehrere Chargen dieses Fluids – jeweils nur in limitierter Menge – zur Verfügung. D320 lag, je nach Charge, gelöst in n-Decan (A und B, B*) oder n-Dodecan (C) vor und besitzt ein ϵ_r von 2,3 (Grau, 2016; Hengen, 2015). n-Dodecan besitzt einen höheren Siedepunkt und einen niedrigeren Dampfdruck als n-Decan (n-Dodecan: Siedepunkt = 216,3 °C, Dampfdruck = 0,4 hPa bei 20 °C; n-Decan:

Siedepunkt = 174 °C, Dampfdruck = 1 hPa bei 16 °C (Merck, 2011)) Die Fluidkennndaten der verwendeten Chargen A, B, B* und C sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Bei Charge B* handelt es sich um eine weitere Abfüllung der Charge B.

Tabelle 4.3: Fluiddaten des Dielektrikums D320 für die Chargen A, B, B* und C, gemessen nach Abschnitt 1.1. Die Dichte von D320#A entstammt dem zugehörigen Sicherheitsdatenblatt und war ohne Fehler angegeben.

	Viskosität mPas	Dichte g / mL	Oberflächenenergie mN / m
D320#A	$47,4 \pm 0,2$	$\sim 0,8$	$24,9 \pm 0,0$
D320#B/#B*	$49,0 \pm 0,1$	$0,759 \pm 0,013$	$23,4 \pm 0,1$
D320#C	$16,0 \pm 0,1$	$0,763 \pm 0,012$	$24,5 \pm 0,2$

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Viskosität η und der Oberflächenspannung σ von der Konzentration, wurde das bezogene Fluid D320#A mit n-Decan verdünnt. Die Konzentration gibt somit den Gewichtsanteil des D320-Fluids am verdünnten Fluid wieder. Diese Vorgehensweise war notwendig, da D320 nur als gebrauchsfertige Lösung und nicht als Feststoff zur Verfügung stand. Abbildung 4.2 zeigt, dass sowohl die Viskosität η als auch die Oberflächenspannung σ mit abnehmendem Lösemittelgehalt, d.h. zunehmendem Gehalt an D320, ansteigen.

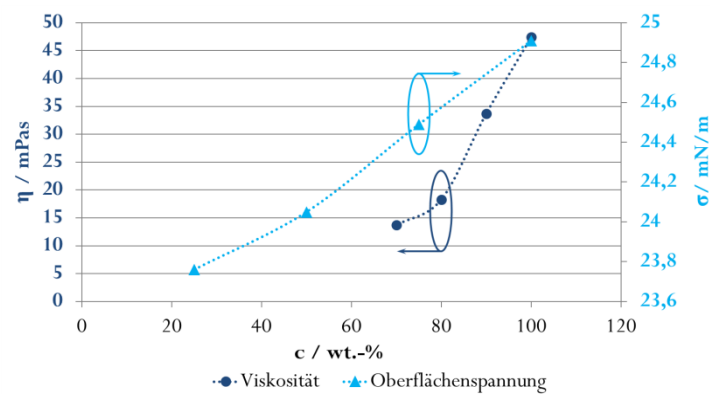


Abbildung 4.2: Viskosität η und Oberflächenspannung σ von D320#A in Abhängigkeit der Konzentration c bei Verdünnung mit n-Decan. Eine Konzentration c von 100 % steht für das unverdünnte D320-Fluid.

4.3 Rheologische und oberflächenanalytische Charakterisierung

Die Viskosität der verwendeten Fluide wurde mit Hilfe eines Rotationsrheometers Haake Mars III der Fa. Thermo Fisher Scientific bestimmt. Es wurde eine Kegel-Platte Konfiguration (Kegel C60/1° TiL) für Messungen im Controlled-Rate-Modus, d.h. Messung der Schubspannung unter ansteigender Scherrate, gewählt. Die Messungen wurden bei 22,5 °C in einem Scherratenbereich von 1 -1000 1/s durchgeführt. Zur Ansteuerung diente die zugehörige Software RheoWinJobManager Version 4.50.0017.

Messungen der Oberflächenenergie der Substrate bzw. der Oberflächenspannung der Fluide wurden an einem Krüss DSA100 Kontaktwinkelmessgerät mit der Methode des liegenden bzw. hängenden Tropfens (Software Advance 1.6.2.0) durchgeführt. Zur Bestimmung der Oberflächenenergie der Substrate wurden die Kontaktwinkel dreier Testfluide auf dem Substrat bestimmt. Diese waren Wasser, Diiodmethan und Ethylenglykol. Es wurde ein Tropfenvolumen von 1-3 µL verwendet. Mit Hilfe der Methode nach *Owens-Wendt-Rabel-Kaelble* (kurz OWRK) kann über den Kontaktwinkel die Oberflächenenergie bestimmt werden. Die Bestimmung der Oberflächenspannung der Fluide erfolgte durch Ermittlung der von einer idealen Kugelform abweichenden Krümmung eines an einer Kanüle hängenden Tropfens, welche durch ein Zusammenspiel von Schwerkraft und Oberflächenspannung zustande kommt. Die hierfür benötigte Dichte des zu untersuchenden Fluids wurde mit Hilfe eines 1 mL umfassenden Pyknometers und demineralisiertem Wasser als Referenzfluid bei 23 °C bestimmt. Für eine exaktere Erläuterung der Verfahren sei auf *Krüss* (Krüss, 2017) und *Tone und Ganz* (2016) verwiesen.

4.4 Substrat- und Bottom-Elektrodevorbehandlung

Sowohl das Schaltungssubstrat an sich als auch die Source-Drain-Elektroden mussten vor Beginn der Prozessierung gereinigt bzw. chemisch modifiziert werden. Letzteres erfolgte mit Hilfe eines *Self-assembled Monolayers*, oder kurz SAMs. SAMs dienen der chemischen Modifizierung von Oberflächen – im Falle des Transistors der Modifizierung der metallischen Elektroden – und sind aus drei Teilen aufgebaut: einer Kopfgruppe, einem Rückgrat und einer Schwanzgruppe (Watcharinyanon, 2008). Die Kopfgruppe bindet an das Substrat und besteht meistens aus Thiolen oder Karbonsäuren, welche an die Metalloberfläche chemisorbieren. Die Schwanzgruppe ist durch ein Alkylrückgrat von der Kopfgruppe getrennt und ist meist funktionalisiert, z.B. durch fluoridierte Endgruppen (Park, 2007). Im organischen Transistor dienen sie der energetischen Anpassung der

Austrittsarbeit der Metallelektrode an das HOMO bzw. LUMO des Halbleiters (Campbell, 1997; Boer, 2005). Je nach Beschaffenheit des Rückgrats kann die durch SAM gebildete erste Schicht auch die Orientierung und Morphologie des sich darauf befindlichen Halbleiters beeinflussen (Park, 2007; Kyymissis, 2001).

Die vereinzelt Schaltungssubstrate wurden durch mehrfaches Abspülen mit reinem 2-Propanol (VWR AnalRNormapur) gereinigt und anschließend mit ölfreier, entfeuchteter Druckluft trocken geblasen. Anschließend wurden alle Substrate einem reinigenden Argonplasma ausgesetzt (Diener Plasma Nano PCCE, 100% Ar, 1 Minute, 100 % von 1000 W Leistung, 7 cm Abstand). Die gereinigten Source-Drain-Elektroden wurden umgehend mit einer gebrauchsfertigen SAM-Lösung (lisicon® M001) behandelt. Hierfür wurden ca. 0,7 mL Fluid auf das 50 x 50 mm große Substrat dosiert. Nach 1 Minute Reaktionsdauer wurde das verbleibende Fluid mittels Spin-Coating bei 2000 rpm für 30 s vom Substrat entfernt. Lösemittelrückstände wurden bei 100 °C für 1 Minute auf der Heizplatte ausgetrieben. Auf eine rasche Weiterprozessierung wurde geachtet. Abbildung 4.3 zeigt die Oberflächenenergie der freien PET-Flächen des Substrats und der Source-Drain-Elektroden nach jedem Schritt der Vorbehandlung, ermittelt nach Abschnitt 1.1.

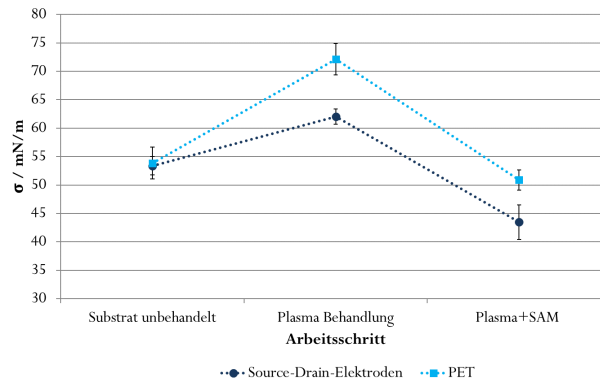


Abbildung 4.3: Oberflächenenergie σ auf den freien PET Flächen zwischen den Elektroden und auf den Source-Drain-Elektroden für jeden Arbeitsschritt der Vorbehandlung, gemessen nach Abschnitt 1.1.

Zur Überprüfung der Benetzbarkeit wurde der Kontaktwinkel aller vier Halbleiterfluide für jeden Schritt der Vorbehandlung bestimmt:

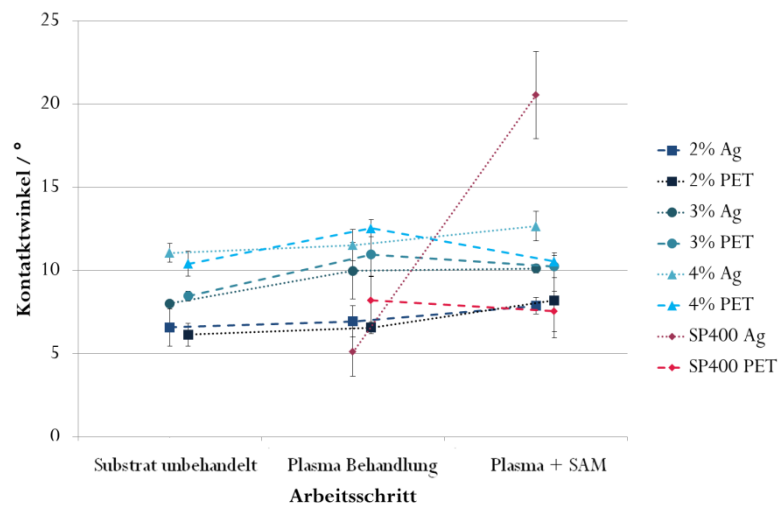


Abbildung 4.4: Kontaktwinkel auf den freien PET Flächen zwischen den Elektroden und den Source-Drain-Elektroden (Ag) für jeden Arbeitsschritt der Vorbehandlung, gemessen nach Abschnitt 1.1. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Gewichtsprozent von PIF8-TAA in Mesitylen.

4.5 Referenzprozess: Spin-Coating

Der Referenzprozess diente der Kontrolle der Funktionalität des Materials sowie als Referenz bei Variation der Versuchsparameter. Je nach Versuch wurden einzelne Schritte im Referenzprozess durch Drucken ersetzt. Spin-Coating wurde als Referenz gewählt, da es eine hohe Reproduzierbarkeit aufweist und die Druckfluide ohne weitere Abwandlungen verwendet werden können.

Die Vorbehandlung der Substrate erfolgte stets wie in Abschnitt 4.4 beschrieben. Im direkten Anschluss wurde 0,7 mL der Halbleiterlösung mit einer Pasteurpipette auf das 50 x 50 mm große Schaltungssubstrat getropft und per Spin-Coating bei 2500 rpm für eine 2 wt.-%ige Lösung von PIF8-TAA sowie bei 3500 rpm für SP400 für 60 s auf dem Substrat verteilt. Die Trocknung erfolgte hier zunächst für 1 Minute bei 60 °C und direkt im Anschluss für 3 Minuten bei 100 °C. Der Spinvorgang für das Dielektrikum B fand anschließend bei 1400 rpm für 60 s statt. Nach weiterem Ausheizen für 1 und 3 Minuten bei 60 bzw. 100°C wurden die Transistoren durch Aufbringen der Gate-Elektrode vervollständigt. Hierfür wurden Goldelektroden mittels eines Cressington Sputter Coaters 108auto appliziert (0,02 mbar, 180 s, ca. 35 nm). Abweichende Versuchsparameter sind in den jeweiligen Abschnitten in Kapitel 5 vermerkt.

4.6 Basisverfahren: Druckprozesse

Für die Herstellung von bottom-contact top-gate Transistoren auf Foliensubstraten wurden insgesamt vier Materialien übereinander gedruckt, siehe Abschnitt 2.1.1.2. Unten angefangen sind dies die meist metallischen Bottom-Elektroden Source und Drain sowie Pads zu deren Kontaktierung. Hierauf folgen der Halbleiter und anschließend das Dielektrikum, welches meist mehrschichtig prozessiert wird um eine ausreichende Isolation zu erreichen. Den Abschluss bildet eine weitere Elektrode, das Gate. Je nach Fluidkennwerten – Viskosität und Oberflächenspannung – und Materialkompatibilität mit den Druckformen wurden die Materialien im rotativen Tiefdruck oder im Flexodruck prozessiert. In dieser Arbeit wird, wenn nicht anders erwähnt, nur auf Versuche eingegangen, bei denen das in Abschnitt 4.1 beschriebene Schaltungssubstrat verwendet wurde. Die Source-Drain-Elektroden waren somit bereits auf dem Substrat vorhanden. Die Gate-Elektrode wurde stets durch Sputtern aufgebracht, da zur Realisierung dieser Untersuchungen eine hohe Reproduzierbarkeit bei hohen Ausbeuten notwendig ist. Auf ein Drucken letzterer wurde deshalb verzichtet, da durch die im Druckprozess auftretenden Drücke (Siebdruck oder Flexodruck) das Dielektrikum an manchen Stellen beschädigt werden kann. Ebenfalls ist es möglich, dass die Silberpartikel der Tinte die Dielektrikumsschicht penetrieren. In beiden Fällen können zusätzliche Leckströme oder Ausfälle die Folge sein. Die verwendeten Verfahren mit ihren Parametern werden sortiert nach Materialien im Folgenden aufgeführt. Abwandlungen der Verfahren werden in den jeweiligen Abschnitten in Kapitel 5 erwähnt.

4.6.1 Halbleiter: Flexodruck

Der Flexodruck wurde für den Halbleiter gewählt, da er zum einen für die Verarbeitung niedrigviskoser Fluide geeignet ist (1-100 mPas (Ganz, 2016)) und da er zum anderen als Hochdruckverfahren das Fluid nur an den druckenden Stellen überträgt. Er fand allerdings nur für den Halbleiter PIF8-TAA Anwendung. Die Versuche wurden hier zur tiefergehenden Untersuchung des Einflusses des Klischees als Ergänzung zu den gemeinsamen Arbeiten mit *Trollmann* (2014) nachgestellt. Da die statische Performance und die Güte und Reproduzierbarkeit des Prozesses (maschinenbedingt) im Tiefdruck besser sind, wurde auf eine Verwendung von SP400 im Flexodruck verzichtet.

Für den Flexodruck wurde eine IGT-F1 Probedruckmaschine verwendet. Als Druckform diente ein Fotopolymer der Marke Nyloflex ACE (unter Verwendung von 3M Klischeeklebeband E1715, 0,83 mm, hart). Als Layout diente ein Streifen, der das Substrat vollständig bedeckt und eine Flächendeckung von 100 % besitzt. Das Schöpfovolumen der lasergravierten Keramikrasterwalze betrug 12 mL/m² bei einer

Lineatur von 120 L/cm. Die Substrate wurden auf einer Trägerfolie (PET Hostaphan® von Pützfolien mit 125 µm Dicke) fixiert, um für einen einheitlich ebenen Untergrund zu sorgen. Diese wurde auf dem eigentlichen Transportschlitten (Aluminium) fixiert. Zum Drucken wurden ca. 0,5 mL des Halbleiterfluids dosiert und nach den in Tabelle 4.4 gegebenen Parametern abgedruckt. Anschließend wurden die Substrate 3 Minuten bei 100 °C auf einer Heizplatte getrocknet.

Tabelle 4.4: Parameter für das Verdrucken des Halbleiters im Flexodruck (IGT-F1).

Parameter	Einstellung	Einheit
F_{Anilox}	100	N
F_{Druck}	100	N
Druckgeschwindigkeit	1	m/s
Aniloxgeschwindigkeit	5	a.u.
Umdrehungen Rasterwalze	1	-
Einfärbungen Klischee	1	-

Zur Erläuterung der Parameter werden im Folgenden die ablaufenden Schritte an einer IGT-F1 beschrieben: Zunächst wird das Rakelmesser mit der Rasterwalze in Kontakt gebracht. Das Fluid kann nun auf das Rakelmesser dosiert werden, um gleichmäßig auf der Rasterwalze verteilt zu werden. Die *Umdrehungen der Rasterwalze* stehen für die Anzahl der Umdrehungen, in denen die Rasterwalze eingefärbt wird. Im Anschluss wird die Rasterwalze mit dem Klischeezylinder in Kontakt gebracht um das vordosierte Fluid auf diesen zu übertragen (Einfärbung). Die *Aniloxkraft* F_{Anilox} beschreibt die Kraft, mit der die Rasterwalze während des Einfärbevorgangs auf den Klischeezylinder gedrückt wird; die *Aniloxgeschwindigkeit*, die Geschwindigkeit mit der das Einfärben stattfindet. Die *Einfärbungen Klischee* beschreiben die Anzahl der Umläufe des Klischees in Kontakt mit der Rasterwalze vor dem Abdrucken. Im nächsten Schritt wird der Klischeezylinder mit einer *Druckkraft* F_{Druck} auf den Gegendruckzylinder gepresst. Die *Druckgeschwindigkeit* ist die Geschwindigkeit mit der der Schlitten durch den Druckspalt durch Zusammenpressen von Klischee- und Gegendruckzylinder befördert wird. Sowohl die Rasterwalze als auch der Klischeezylinder haben eine Breite von 50 mm, wobei die Druckbreite 40 mm beträgt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Rasterwalze wurden vier verschiedene Rasterwalzen verwendet. Alle Rasterwalzen sind hexagonal lasergraviert und besitzen eine Keramikoberfläche. Das vom Hersteller angegebene Soll-Schöpfvolumen wurde anhand von 10 Messpunkten mit einer AniCAM der Fa. Troika Systems Ltd. überprüft. Ihre Spezifikationen sind im Folgenden aufgeführt:

Tabelle 4.5: Spezifikationen der verwendeten Rasterwalzen.

Walze	Nummer	Lineatur	Soll-Schöpfungsvolumen	Ist-Schöpfungsvolumen
24	402-413	90 L/cm	16 mL/m ²	24 mL/m ²
10	402-411	120 L/cm	12 mL/m ²	10 mL/m ²
12	402-402	180 L/cm	8 mL/m ²	12 mL/m ²
6	402-422	300 L/cm	4,5 mL/m ²	6 mL/m ²

4.6.2 Halbleiter: Tiefdruck

Der rotative Tiefdruck wurde als Alternative zum Flexodruck gewählt, da er in ähnlichen Viskositätsbereichen einsetzbar ist und durch die chemische Stabilität seiner Maschinenkomponenten gegenüber aromatischer Lösemittel Vorteile aufweist.

Zur Aufbringung beider Halbleiter im Tiefdruck wurde die Labordruckmaschine Superproofer 220 der Fa. GT+W verwendet. Die Substrate wurden mit einer PET-Trägerfolie (PET Hostaphan® von Pützfolien mit 125 µm Dicke) als Träger auf dem Substratschlitten fixiert. Diesem wurde durch Aufkleben von Gummimatten eine Kompressibilität gegeben.

Das Drucken erfolgte mit einem elektromechanisch gravierten Sleeve bei einer Druckgeschwindigkeit von 3 m/s, einem Presseurdruck von 16080 mN/mm und einem Rakeldruck von 320 mN/mm. Für die beiden Halbleiter wurden verschiedene Sleeves verwendet.

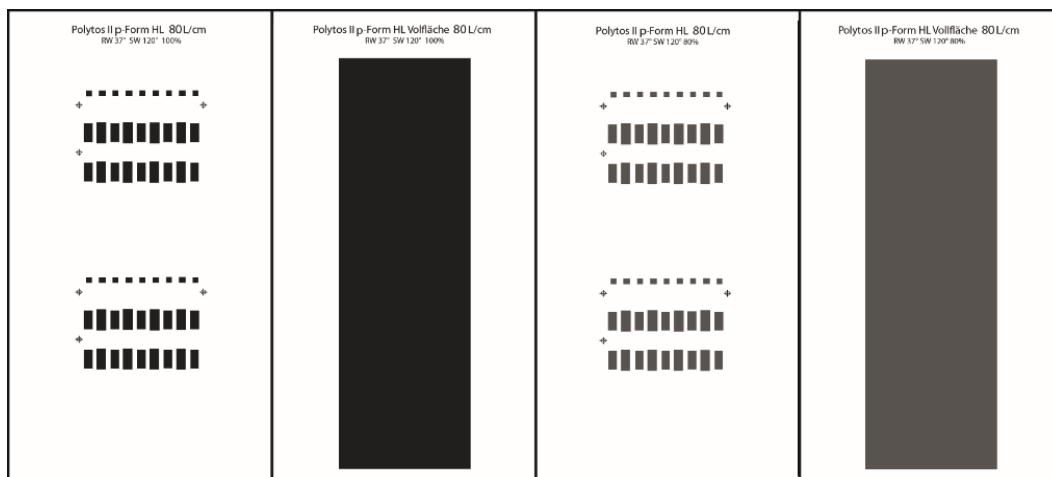


Abbildung 4.5: 4 Layouts eines jeden Sleeves für den GT+W Superproofer.

Jedes von ihnen enthält vier verschiedene Register, siehe Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7, die sich in Flächendeckung und Layout (Vollfläche (VF) oder Einzeltransistoren (L)) unterscheiden, siehe Abbildung

4.5. Die Vollfläche beschreibt in diesem Fall keine Flächendeckung, sondern ein rechteckiges Layout, das die volle Druckfläche einschließt. Nach dem Drucken wurden die Substrate von der Trägerfolie entfernt und umgehend bei zunächst 60 °C für 1 Minute und anschließend bei 100 °C für 3 Minuten auf einer Heizplatte getrocknet.

Tabelle 4.6: Gravurparameter des für das Drucken des Halbleiters PIF8-TAA im Basisverfahren verwendeten Sleeves. Die Abkürzungen VF und L im Registernamen stehen für das jeweilige Drucklayout: Vollfläche VF oder Einzeltransistoren L. Der Registername setzt sich zusammen aus: pHL (Material für das er bestimmt ist, p-Halbleiter), der Lineatur, dem Layout und der Flächendeckung.

Register	Rasterweite	Stichelwinkel	Flächendeckung
pHL80-VF-100	80 L/cm	120 °	100%
pHL80-L-100	80 L/cm	120 °	100%
pHL80-VF-80	80 L/cm	120 °	80%
pHL80-L-80	80 L/cm	120 °	80%

Tabelle 4.7: Gravurparameter des für das Drucken des Halbleiters SP400 im Basisverfahren verwendeten Sleeves.

Register	Rasterweite	Stichelwinkel	Flächendeckung
pHL140-VF-100	140 L/cm	140 °	100%
pHL140-L-100	140 L/cm	140 °	100%
pHL140-VF-80	140 L/cm	140 °	80%
pHL140-L-80	140 L/cm	140 °	80%

4.6.3 Dielektrikum: Tiefdruck

Das Aufbringen des Dielektrikums wurde auf drei verschiedenen Maschinen durchgeführt: mit der IGT-G1 Tiefdruckprobemaschine (D320#A), der IGT-F1 Flexodruckprobedruckmaschine (D320#A) im Einfärbevorgang sowie mit dem GT+W Superproof (D320#B und D320#C). Mit allen Verfahren wurden mehrschichtige Dielektrika unter Zwischentrocknung hergestellt. Unter Zwischentrocknen versteht man das Trocknen der erzeugten Schichten zwischen zwei Prozessschritten.

Für den Tiefdruck mit der IGT-G1 wurden die mit Halbleiter beschichteten Schaltungssubstrate auf einem Trägersubstrat (PET Hostaphan® von Pützfolien mit 125 µm Dicke) fixiert, welches mit dem eigentlichen flexiblen Substratschlitten verbunden wurde. Als Druckform diente ein elektromechanisch gravierter Chromzylinder mit einem Schöpfvolumen von 4,5 mL (Lineatur 140 L/cm,

Stichelwinkel 140°). 0,7 mL des Dielektrikums wurden mit einer Druckkraft von 700 N (auf 50 mm Druckbreite) und einer Geschwindigkeit der Stufe 4 (entspricht 0,8 m/s) verdrückt. Die Substrate wurden samt Trägersubstrat auf der Heizplatte für 3 Minuten bei 100°C ausgeheizt. Der Druckvorgang wurde insgesamt bis zu dreimal wiederholt. Final wurden die Substrate vom Trägersubstrat gelöst und für 5 Minuten bei 100°C ausgeheizt.

Bei Verwendung der IGT-F1 wurde der Einfärbevorgang des Klischeezylinders als Tiefdruckprozess genutzt, d.h. die Rasterwalze wurde durch einen Tiefdruckzylinder und das Klischee durch eine Gummimatte, die als flexibler Untergrund diente, ersetzt. Die Substrate wurden auf der aromatenbeständigen Gummimatte fixiert. Gedruckt wurde in einem Abdruck mit einer Druckkraft $F_{\text{Anilox}} = 100\text{ N}$ und einer Druckgeschwindigkeit der Stufe 3¹². Zum Trocknen wurden die Substrate von der Gummimatte gelöst und anschließend zum erneuten Drucken wieder fixiert.

Für den GT+W Superproofer wurde analog zum Halbleiter, siehe Abschnitt 4.6.2, ein elektromechanisches Sleeve mit vier verschiedenen Registern eingesetzt, siehe Tabelle 4.8. Gedruckt wurde mit einem Presseurdruck von 16000 mN/mm, einem Rakeldruck von 320 mN/mm und einer Geschwindigkeit von 3 m/s. Die Substrate wurden mit samt dem Trägersubstrat zwischentrocknet. Alle Trocknungsschritte erfolgten für 1 Minute bei 60°C und für 3 Minuten bei 100°C .

Tabelle 4.8: Gravurparameter des für das Drucken des Dielektrikums verwendeten Sleeves. Die Abkürzungen VF und L im Registernamen stehen für das jeweilige Drucklayout: Vollfläche VF oder Einzeltransistoren L. Der Registername setzt sich zusammen aus: pDE (Material für das er bestimmt ist, p-Dielektrikum), dem Layout und der Flächendeckung.

Register	Rasterweite	Stichelwinkel	Flächendeckung
pDE80-VF-100	80 L/cm	120°	100%
pDE80-L-100	80 L/cm	120°	100%
pDE80-VF-80	80 L/cm	120°	80%
pDE80-L-80	80 L/cm	120°	80%

¹² Es konnten keine Angaben zur Umrechnung in eine SI-Einheiten entsprechenden Geschwindigkeit gefunden werden.

4.7 Optische Charakterisierung und Schichtdickenmessung

Zur optischen Charakterisierung sowie zur Schichtdickenbestimmung wurden sowohl der Halbleiter als auch das Dielektrikum mittels Druck oder Spin-Coating auf Gläser aufgebracht. Eine direkte Charakterisierung auf Folie (Schaltungssubstrat, was einer 50 μm PET-Folie entspricht bzw. alternativ 125 μm Hostaphan® PET) erfolgte nur stellenweise, da eine Messung auf Folie aufgrund deren hohen makroskopischen Welligkeit zu hohen Messfehler und nicht reproduzierbaren Ergebnissen geführt hatte. Die makroskopischen Welligkeiten entstehen zum einen durch die geringe Steifigkeit des Substrats an sich und zum anderen durch die thermische Verformung der Substrate während der Trocknungsprozesse. Des Weiteren ist das Erzeugen von scharfen Kanten innerhalb einer Schicht, wie sie zur Messung einer Schichtdicke benötigt werden, in vielen Fällen nicht gelungen. Bei Verwendung eines Skalpells wurde oft in die Folie hinein geschnitten, bei Wegwischen der Schicht blieb oft ein Rest auf der Folie zurück. Deshalb wurde das abweichende Benetzungsverhalten auf Glas aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit und geringen Schwankungen während des Messens in Kauf genommen, siehe Abbildung A.17.

Die Fluide wurden – dem Verfahren dessen Schichtdicke untersucht werden sollte entsprechend mit Druck oder Spin-Coating – auf 50 x 50 mm Objektträger (Kalknatronglas) aufgebracht. Die Gläser wurden zuvor in einem Laborspülautomaten vorgereinigt (alkalische Reinigung, saure Neutralisierung sowie Nachspülen mit demineralisiertem Wasser) und anschließend weitere 5 Minuten in reinem, unvergällten Ethanol im Ultraschallbad behandelt. Nach dem Trocknen mit Druckluft wurden sie unmittelbar beschichtet um erneute Kontaminationen zu vermeiden. Es ist anzumerken, dass durch die Reinigung mit dem Laborspülautomaten die Oberflächenenergie der Gläser von $62,1 \pm 2,3 \text{ mN/mm}$ auf $55,0 \pm 2,0 \text{ mN/mm}$ herabgesetzt wurde (Bechtold, 2017).

Die Messung der Schichtdicken erfolgte je nach Schichtdicke und Material sowohl optisch (konfokal oder interferometrisch) als auch taktil. Zur Erzeugung einer künstlichen Kante wurden alle Schichten kreuzförmig eingeritzt. Die Messung der Schichtdicke an den erzeugten Kanten erfolgte jeweils an 5 Punkten dieses Kreuzes: etwa bei 2/3 der 4 Armlängen sowie in der Mitte. Bei Taktilen Messungen wurden 10 Messpunkte gewählt.

Die optischen Messungen wurden mit dem Profilometer Plu Neox der Fa. Sensofar, Spanien, durchgeführt. Zum Einsatz kamen hier die Konfokalmikroskopie für Dielektrikumsschichtdicken (500-3000 nm) und die Phasenverschiebungsinterferometrie (PSI) für Halbleiterschichtdicken (50-150 nm). Für erstere wurde ein Objektiv mit fünfzigfacher Vergrößerung und einer numerischen Apertur von

0,95 gewählt, für letztere ein Objektiv mit fünfzigfacher Vergrößerung und numerischer Apertur von 0,55. Es wurde ein Schwellenwert der Helligkeit von 9 % gewählt. Das Profilometer wurde durch die zugehörige Software SensoScan Version 3.1.2.16 gesteuert.

Die taktilen Messungen erfolgten an einem Bruker DektakXT unter Verwendung eines 2,5 μm Diamant Stylus. Alle Messungen wurden mit einer Kraft von 3 mg durchgeführt, über eine Länge von 2000 μm bei einer Dauer von 10 s, resultierend in einer Auflösung von 0,666 $\mu\text{m}/\text{pt}$. Zur Bedienung diente die Software Vision 64 Version 5.51 Update 2. Es ist zu beachten, dass bei der Vermessung weicher Schichten der Diamant während des Messens in die Schicht einzudringen vermag, siehe Abbildung A.18. Es könnte somit ein zu niedriger Wert ermittelt werden.

5. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchung der mittels eTOF-Messungen ermittelten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen an gedruckten OFETs vorgestellt. Im ersten Abschnitt wird der Einfluss der verschiedenen *Eingangsparameter* aus dem Messaufbau gezeigt, sowie die Wahl der jeweiligen Einstellung begründet. Im zweiten Abschnitt erfolgt die Vorstellung der hypothesenbasierten Untersuchung des *Einflusses der Schichtdicke des Halbleiters*, des *Druckprozesses* an sich sowie der *Schichtdicke des Dielektrikums*.

5.1 Einstellung der Eingangsparameter

Für den in Abschnitt 3.2.2.1 gezeigten Messaufbau gibt es drei *Eingangsparameter*, die durch den Aufbau festgelegt sind. Diese sind der Messwiderstand R_L , die Gate-Spannung V_g sowie die *Höhe des Rechteckpulses* V_{max} . Mit den Einflüssen dieser Parameter beschäftigt sich dieser Abschnitt. Des Weiteren wurden Parameter zur Charakterisierung der Abhängigkeit der Verteilung von den Belichtungsbedingungen des Substrates und somit der *photonischen Injektion von Ladungsträgern* festgelegt. Auch diese werden eingehend vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Erläuterung der *Schwankungen*, die aus dem Herstellungsprozess an sich, d.h. aus der Prozessierung aus Flüssigphase, resultieren. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt durch eine *Interpretation* der physikalischen Hintergründe hinter den definierten *Kennwerten*.

5.1.1 Messwiderstand

Um aus der gemessenen Spannung den geflossenen Strom ermitteln zu können, wird der Spannungsabfall an einem definierten Widerstand, dem Messwiderstand, gemessen. Der Messwiderstand muss so gewählt werden, dass er zum einen so klein ist, dass keine allzu große zeitliche Verzögerung entsteht, siehe Abbildung 5.1, und zum anderen so groß ist, dass das Digitalisierungsrauschen klein bleibt und ein reproduzierbar auswertbares Signal entsteht. Zur Ermittlung des optimalen Widerstandes wurde für verschiedene Widerstände zwischen 470 und 100.000 Ohm der Spannungsabfall aufgezeichnet und in normierter Darstellung miteinander verglichen, siehe Abbildung 5.1 für Transistoren mit 25 μm Kanallänge und Abbildung A.1 für 10 μm Kanallänge. Im Bereich optimaler Widerstände sollte sich die transiente Antwort bei Variation des Widerstandes nicht ändern (Lee, 2011).

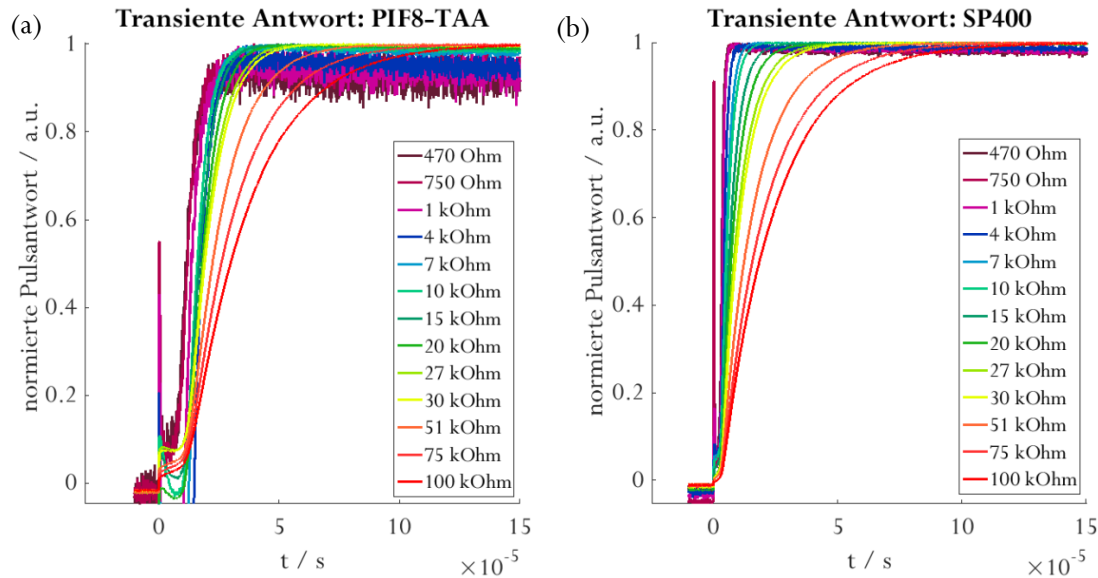


Abbildung 5.1: Normierte Pulsantwort in Abhängigkeit der Zeit t und als Funktion des Messwiderstandes R_L der Halbleiter PIF8-TAA (a) und SP400 (b). In beiden Fällen handelt es sich um die Rise-Flanke eines Transistors mit 25 μm Kanallänge¹³ bei 10 V Pulshöhe. Die Gate-Spannungen betragen 10 bzw. 0 V.

Im Falle des Halbleiters PIF8-TAA wurde fortan ein 27 k Ω Widerstand verwendet, im Falle des Halbleiters SP400 ein 10 k Ω Widerstand. Niedrigere Widerstände haben in beiden Fällen zu starkem Rauschen im Signal geführt, durch welches die Auswertung sich zum einen nicht mehr zuverlässig und ohne individuelle Anpassungen durchführen ließ und zum anderen die zu ermittelnden Parameter falsch extrahiert wurden. Die Art des verwendeten Widerstandes – Kohle oder Metall – zeigt keinen Einfluss auf die Messung (Radkhah, 2015).

Um den Einfluss, den der Messwiderstand auf die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung haben kann, aufzuzeigen ist diese in Abbildung 5.2 beispielhaft für den SP400-Transistor 0471#27¹⁴ dargestellt. Für Widerstände größer 20 k Ω fällt der größere Teil der Spannung am Messwiderstand ab und die Verteilung verschiebt sich hin zu niedrigeren Ladungsträgergeschwindigkeiten bzw. bildet einen zweiten Peak bei niedrigerer Ladungsträgergeschwindigkeit aus. Durch den hohen Spannungsabfall am Messwiderstand verlangsamt sich das Laden des Kanals und verursacht eine erhöhte Verzögerung im Transport der Ladungsträger.

¹³ Probe PIF8-TAA - 0450#22: Halbleiter Spin-Coating bei 4500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 an einem einzelnen Transistor.

Probe SP400 - 0471#24: Halbleiter Spin-Coating bei 2500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 an einem einzelnen Transistor.

¹⁴ Probe SP400 - 0471#27: Halbleiter Spin-Coating bei 2500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

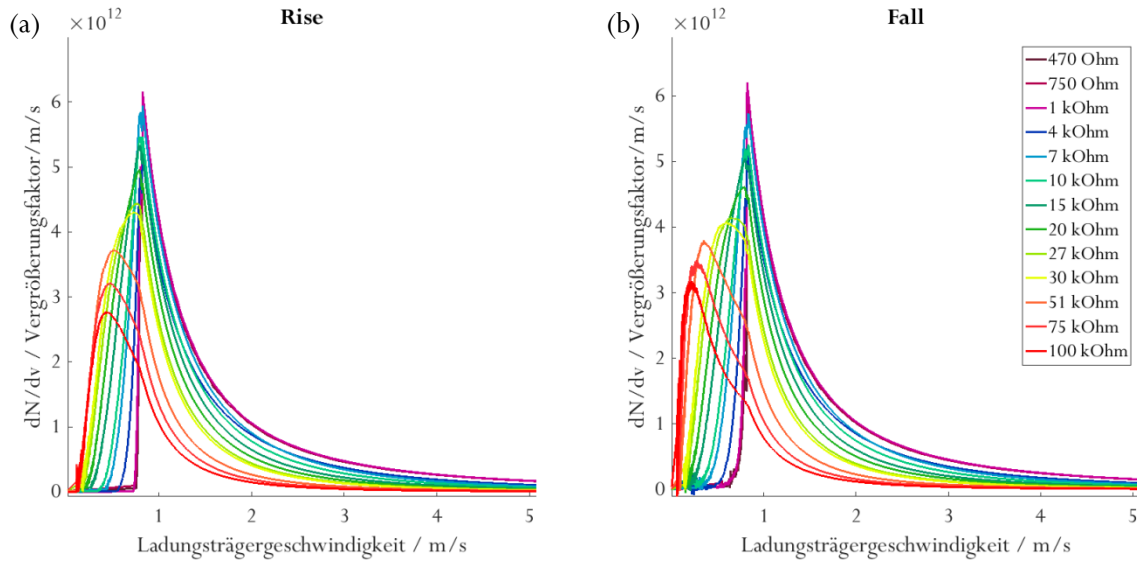


Abbildung 5.2: Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung als Funktion des Messwiderstandes des SP400-Transistors 0472#27 mit 10 μm Kanallänge bei 0 V Gate-Spannung und 10 V Pulshöhe. Es ist anzumerken, dass die Verteilung noch den Vergrößerungsfaktor (20.000) enthält, siehe Gleichung 3.25 in Abschnitt 3.2.2.2.

Die Verschiebung der Verteilung hin zu niedrigeren Ladungsträgergeschwindigkeiten bzw. die Ausbildung des zweiten Peaks zeigt sich auch deutlich in den *Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$, siehe Abbildung 5.3. Ab einem Messwiderstand von 51 $\text{k}\Omega$ stellt der neu aufkommende zweite Peak das Maximum dar. Das Verhalten ist für die ansteigende und abfallende Flanke identisch, allerdings ist bei letzterer die Ausprägung des zweiten Peaks deutlicher, siehe Abbildung 5.2 (b).

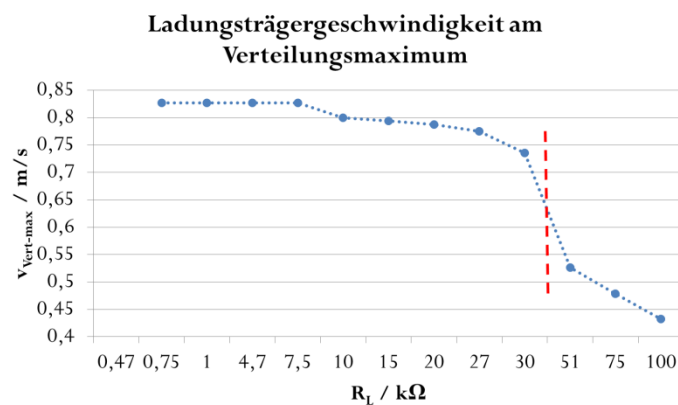


Abbildung 5.3: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ in Abhängigkeit des Messwiderstandes R_L für den Transistor 0471#27. Auffällig ist der Sprung der Geschwindigkeiten zwischen 30 und 51 $\text{k}\Omega$. Messungen an Messwiderständen unterhalb dieses Sprungs gelten als signifikant.

5.1.2 Gate-Spannung

Mit dem Anlegen einer Gate-Spannung V_g bezweckt man im gewählten Aufbau, siehe Abschnitt 3.2.2.1 und Abbildung 3.5, den Effekt, dass zunehmend Ladungsträger im Kanal akkumuliert werden, wodurch die Leitfähigkeit des Kanals steigt und die Mobilität der Ladungsträger zunimmt. Dieses Phänomen ist bekannt als *Gate-Spannungsabhängigkeit* der Mobilität, siehe Abschnitt 2.1.2.2. Zur Untersuchung des Einflusses der Gate-Spannung V_g wurde diese zwischen 0 und -30 V in 5 V Schritten variiert. In diesem Abschnitt wird jedoch stets der Betrag der Gate-Spannung $|V_g|$ zur Beschreibung der Beobachtungen verwendet.

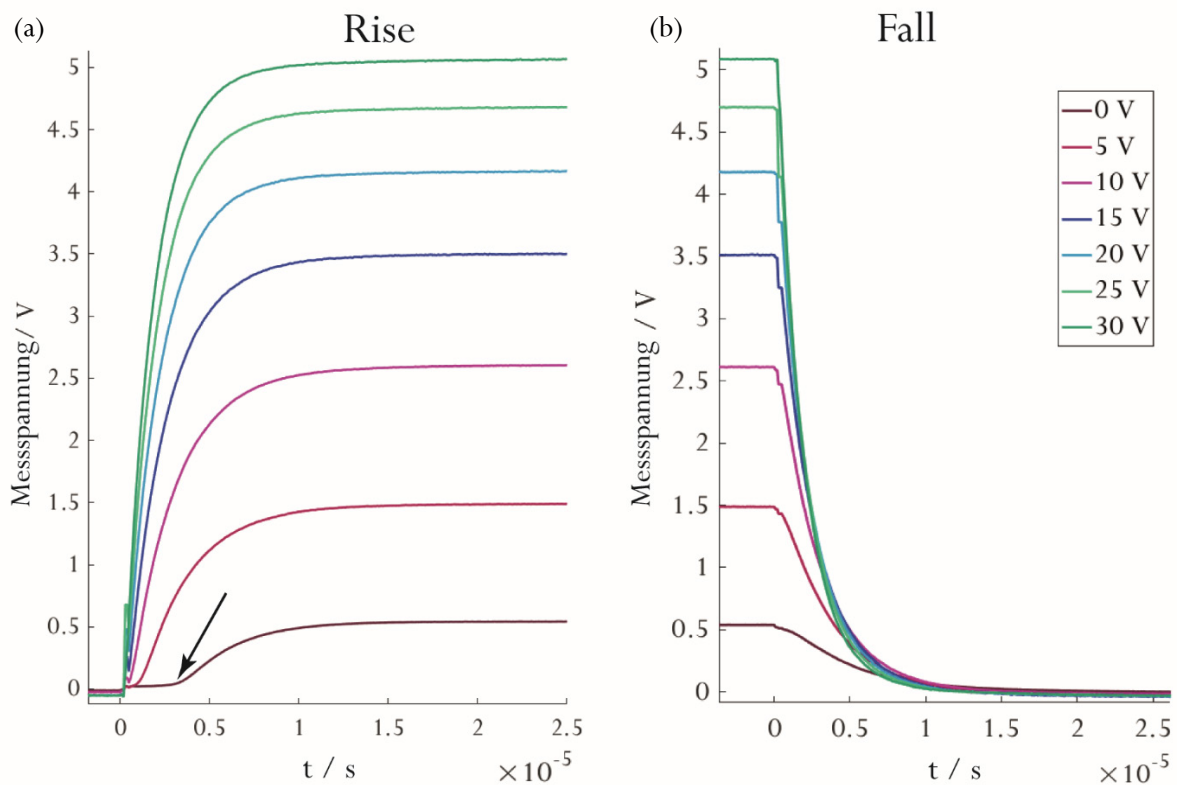


Abbildung 5.4: Ansteigende Flanke *Rise* (a) und abfallende Flanke *Fall* (b) der Pulsantwort in Abhängigkeit der Zeit t und als Funktion des Betrags der Gate-Spannung $|V_g|$ für den SP400-Transistor 0471#24¹⁵ mit 25 μm Kanallänge. Der Pfeil markiert die Verzögerungszeit bis zum Anstieg der Spannung bei 0 V Gate-Spannung.

Abbildung 5.4 zeigt die Pulsantwort des Transistors 0471#2415 (Halbleiter SP400, 25 μm Kanallänge) für die ansteigende und abfallende Flanke als Funktion des Betrags der Gate-Spannung $|V_g|$. Der Pfeil

¹⁵ Probe SP400 - 0471#24: Halbleiter Spin-Coating bei 2500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

in (a) markiert die Transitzeit t_{tr} , d.h. den Beginn des Anstiegs des an Drain verzeichneten Stroms. Mit zunehmender Gate-Spannung steigt die transiente Antwort schneller an, die Transitzeit t_{tr} sinkt. Auch an der abfallenden Flanke (b) ist ein schnelleres Abfallen der Spannung mit zunehmender Gate-Spannung $|V_g|$ zu beobachten. Die zugehörigen Transitzeiten t_{tr} sind in Abbildung 5.5 gemeinsam mit dem Gütefaktor α dargestellt, welcher aus dem Verhältnis der Transitzeiten zwischen *Fall* und *Rise* gebildet wird, siehe Abschnitt 3.1.4.3. α steigt mit zunehmender Gate-Spannung $|V_g|$ an und bewegt sich ab 10 V in einem Plateau.

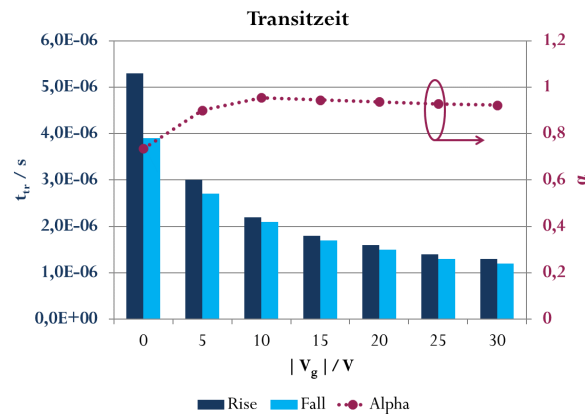


Abbildung 5.5: Transitzeiten t_{tr} der ansteigenden Flanke *Rise* und der abfallenden Flanke *Fall* in Abhängigkeit des Betrags der Gate-Spannung $|V_g|$ sowie deren Verhältnis α des Transistors 0471#24¹⁵.

Abbildung 5.6 zeigt die normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit des Betrags der Gate-Spannung $|V_g|$. Mit zunehmender Gate-Spannung $|V_g|$ verschiebt sich das Maximum der Kurven hin zu höheren Ladungsträgergeschwindigkeiten und der Abstand zwischen den Maxima wird geringer. Besonders deutlich zu erkennen ist der Sprung zwischen 0 und 5 Volt. Bei 0 Volt Gate-Spannung beginnt die Akkumulation der Ladungsträger erst mit Zuschalten des Pulses und der damit verbundenen Verringerung des Source-Gate-Potentials. Bei allen Gate-Spannungen $|V_g|$ darüber konnten sich Ladungsträger – in mehr oder minder großen Mengen – bereits im Kanal akkumulieren. Dies drückt sich durch den größeren Unterschied der Null-Volt-Verteilung im Vergleich zu den anderen Verteilungen aus. Ab 15 V Gate-Spannung ist kein Unterschied zwischen den Maxima erkennbar. Dies ist auf die Auflösung des Oszilloskops (0,1 μs) zurückzuführen. Dieser Trend spiegelt sich auch in der Transitzeit t_{tr} , wider, siehe Abbildung 5.5.

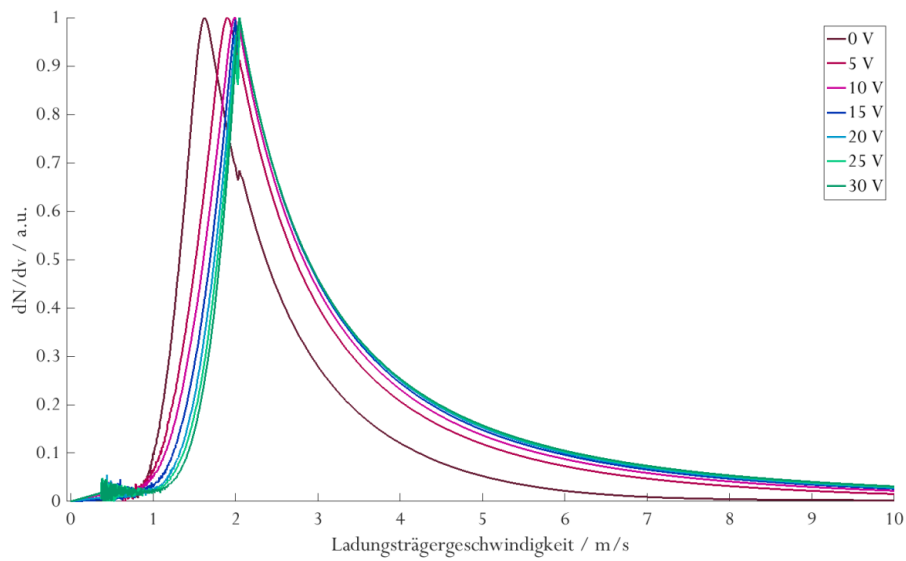


Abbildung 5.6: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* als Funktion des Betrags der Gate-Spannung $|V_g|$ für den SP400-Transistor 0471#24¹⁵ mit 25 µm Kanallänge. Die abfallende Flanke *Fall* ist in Abbildung A.2 dargestellt.

Die Anzahl der verzeichneten Ladungsträger N_{LT} , siehe Abbildung 5.7 (a), steigt mit zunehmender Gate-Spannung an, da durch die erhöhte Leitfähigkeit des Kanals und die damit verbundene hohe Besetzungszahl an Fallenzuständen mehr Ladungsträger transportiert werden können. Des Weiteren sind die Verteilungen bei angelegter Gate-Spannung breiter als ohne angelegte Gate-Spannung.

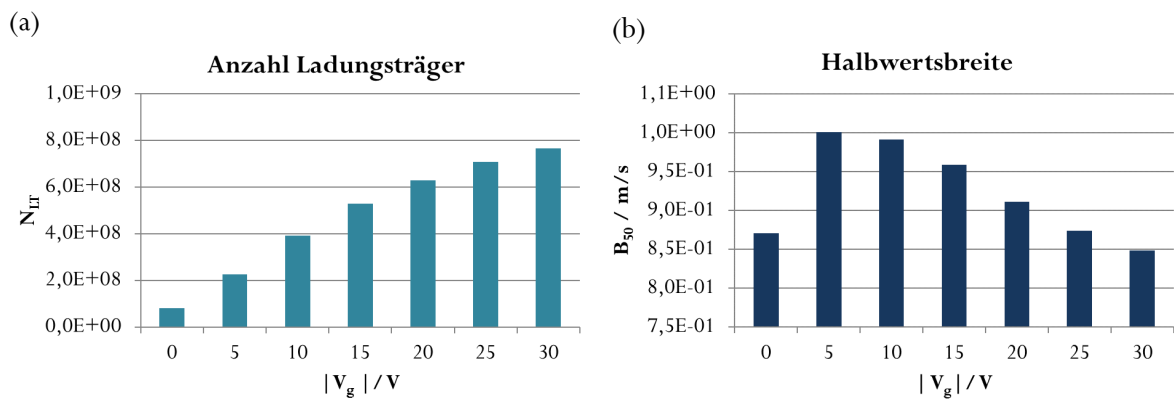


Abbildung 5.7: Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (a) und Halbwertsbreite B_{50} (b) in Abhängigkeit des Betrags der Gate-Spannung $|V_g|$ für Transistor 0471#24¹⁵.

Die Halbwertsbreite B_{50} ist für fünf und zehn Volt am höchsten und nimmt mit zunehmender Gate-Spannung ab, d.h. dass mit zunehmender Gate-Spannung das Spektrum an auftretenden Geschwindigkeiten geringer wird, siehe Abbildung 5.7 (b). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass

bei hohen Gate-Spannung die Zustände bis in höhere energetische Bereiche befüllt sind. Die Zustände liegen hier enger beieinander und die möglichen Transportpfade durch den Halbleiter ebenfalls, was sich durch ähnliche Transportzeiten ausdrückt. Die Trends der Kennwerte sind für je einen Transistor mit 10 sowie 25 μm Kanallänge im Folgenden zusammengefasst:

Tabelle 5.1: Trends der Kennwertentwicklung für zunehmende Gate-Spannungen für die SP400-Transistoren 0471#31¹⁶ (10 μm) und 0471#24 (25 μm). Für die Definition der Parameter sowie die Bedeutung der verwendeten Symbole siehe Abschnitt 3.2.2.2.

Parameter	SP400			
	10 μm Rise	25 μm Rise	10 μm Fall	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	→	↗	→	↗
$V_{\text{Vert-start}}$	↗	↗	↗	↗
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	↗	↗	↗	↗
Halbwertsbreite B_{50}	↘	○	↘	↘
Tailing bei 50 %	↘	↘	↘	↘
Transitzeit t_{tr}	↘	↘	↘	↘

Tabelle 5.2: Trends der Kennwertentwicklung für zunehmende Gate-Spannungen für die PIF8-TAA-Transistoren 0450#31¹⁷ (10 μm) und 0450#24¹⁷ (25 μm). Für die Definition der Parameter sowie die Bedeutung der verwendeten Symbole siehe Abschnitt 3.2.2.2.

Parameter	PIF8-TAA			
	10 μm Rise	25 μm Rise	10 μm Fall	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	↗	↗	↗	↗
$V_{\text{Vert-start}}$	↗	↘	↗	↗
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	↗	↗	↗	↗
Halbwertsbreite B_{50}	↗	↗	↗	↗
Tailing bei 50 %	○	○	→	○
Transitzeit t_{tr}	↘	↘	↘	↘

Bei den Transistoren des Halbleiter PIF8-TAA, siehe auch Abbildung A.3, kann im Gegensatz zum obigen Halbleiter SP400 eine Zunahme der Verteilungsbreit B_{50} beobachtet werden. Auch das Tailing nimmt

¹⁶ Probe SP400 - 0471#31: Halbleiter Spin-Coating bei 2500 rpm; Dielektrikum D320#B; nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

¹⁷ PIF8-TAA - 0450#31 und #24: Halbleiter Spin-Coating bei 4500 rpm; Dielektrikum D320#B; nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

nicht in gleichem Maße ab. Dies könnte zum einen auf die schlechtere Extraktionsgüte aus PIF8-TAA-Messungen zurückzuführen oder auf das Vorhandensein sehr vieler unbesetzter energetischer Zustände bzw. sekundärer Leitungspfade.

Da zum einen die Formierung des Kanals bei 0 V Gate-Spannung und zum anderen das Verhalten der Transistoren bei vorgespanntem Gate analysiert werden soll, werden entsprechend eine Gate-Spannung von 0 V für den Halbleiter SP400 und eine Gate-Spannung von 10 V für den Halbleiter PIF8-TAA gewählt. Die Einteilung war nur in dieser Kombination möglich, da für den Halbleiter PIF8-TAA bei 0 V Gate-Spannung kein genügend rauscharmes Signal ermittelt werden konnte.

5.1.3 Pulshöhe

Die Pulshöhe V_{max} , d.h. die Höhe der angelegten Spannung, siehe auch Abbildung 3.6, wirkt sich sowohl auf das Source-Gate-Potential als auch auf das Source-Drain-Potential aus. Ersteres resultiert wie im vorherigen Abschnitt vorgestellt in einer Erhöhung der Mobilität, letzteres in einer Erhöhung des lateralen elektrischen Feldes. Beide Faktoren bewirken, dass mit zunehmender Pulshöhe die Ladungsträrgeschwindigkeit steigt (Lee, 2011). Zur Untersuchung dieses Effekts wurde die Pulshöhe V_{max} in 2 V Schritten zwischen 2 und 10 V variiert. Für den Halbleiter SP400 wurde eine Gate-Spannung von 0 V gewählt, für den Halbleiter PIF8-TAA eine Gate-Spannung von 10 V.

Tabelle 5.3: Trends der extrahierten Parameter für den Halbleiter PIF8-TAA der Transistoren 0450#26¹⁸ und #31¹⁸. Alle Trends beziehen sich auf eine ansteigende Pulshöhe. Für die Definition der Parameter sowie die Bedeutung der verwendeten Symbole siehe Abschnitt 3.2.2.2.

Parameter	PIF8-TAA			
	10 μm Rise	25 μm Rise	10 μm Fall	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	↗	↗	(↗)	↗
$V_{\text{Vert-start}}$	↗	○	↗	↗
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	↗	↗	↗	↗
Halbwertsbreite B_{50}	↗	↗	↗	⊗
Tailing bei 50 %	↗	○	○	○
Transitzeit t_{tr}	↘	↘	(↘)	↘

¹⁸ Probe PIF8-TAA - 0450#31 und #26: Halbleiter Spin-Coating bei 4500 rpm; Dielektrikum D320#B; nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

Für den Halbleiter PIF8-TAA, siehe Tabelle 5.3, nehmen bei angelegter Gate-Spannung sowohl die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$, als auch bei Beginn der Verteilung $v_{\text{Vert-Start}}$ zu und die *Transitzeit* t_{tr} nimmt ab. Mit zunehmender Pulshöhe V_{max} steigt also die Geschwindigkeit der Ladungsträger. Dies ist zum einen auf die Erhöhung der Akkumulation als auch auf die des lateralen E-Feldes zurückzuführen (Ha, 2012). Auch die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} nimmt zu, was für eine zunehmende Besetzung von Fallenzuständen spricht. Die Zunahme der *Verteilungsbreite* B_{50} könnte darauf zurückzuführen sein, dass durch das erweiterte laterale E-Feld tiefere oder bisher nicht erreichbare Fallenzustände befüllt bzw. entleert werden können. Hierdurch stehen weitere Zustände für das Hopping zur Verfügung, was sich in einer erhöhten Anzahl an Pfaden und somit in den Ladungsträgerlaufzeiten ausdrückt.

Tabelle 5.4: Trends der extrahierten Parameter für den Halbleiter SP400 der Transistoren 0471#24¹⁹ und #27¹⁹. Alle Trends beziehen sich auf eine ansteigende Pulshöhe. Für die Definition der Parameter sowie die Bedeutung der verwendeten Symbole siehe Abschnitt 3.2.2.2. Die Abkürzung ALG steht für das Erreichen der Auflösungsgrenze des Verfahrens.

Parameter	SP400			
	10 μm Rise	25 μm Rise	10 μm Fall	25 μm Fall
$v_{\text{Vert-max}}$	ALG	\nearrow	ALG	\nearrow
$v_{\text{Vert-start}}$	(\nearrow)	\nearrow	\nearrow	(\nearrow)
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	\nearrow	\nearrow	\nearrow	\nearrow
Halbwertsbreite B_{50}	\searrow	\nearrow	\searrow	\otimes
Tailing bei 50 %	\searrow	\bigcirc	\searrow	\bigcirc
Transitzeit t_{tr}	\searrow	\searrow	ALG	\searrow

Tabelle 5.4 zeigt ein leicht abweichendes Verhalten für den Halbleiter SP400, welcher ohne angelegte Gate-Spannung untersucht wurde. Zunächst zeigt sich, dass sowohl die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$, als auch bei *Beginn der Verteilung* $v_{\text{Vert-Start}}$ sowie die *Anzahl an Ladungsträgern* N_{LT} analog zum Halbleiter PIF8-TAA zunehmen. Die Ladungsträgergeschwindigkeit verschiebt sich hin zu höheren Geschwindigkeiten. Dies bestätigt die Beobachtung von Ha et al. (2012) bei 0 Volt Gate-Spannung. Abweichend zum Halbleiter PIF8-TAA zeigt sich allerdings bei den 10 μm -Transistoren hier, eine Abnahme der *Verteilungsbreite* B_{50} . Auch das Tailing nimmt mit zunehmender Pulshöhe V_{max} ab. Dies bedeutet, dass sich die Verteilung hin zu höheren Geschwindigkeiten verformt. Es ist anzumerken, dass

¹⁹ Probe SP400 - 0471#31: Halbleiter Spin-Coating bei 2500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

sich im Falle der Transistoren mit 10 μm Kanallänge die Messergebnisse im Bereich der Auflösungsgrenze des gewählten Messfensters am Oszilloskop (0,1 μs) befinden und die Parameter möglicherweise nicht korrekt extrahiert wurden. Die Kennwerte der ansteigenden Flanke sind in Anhang A.2 Tabelle A.5 bis Tabelle A.8 aufgeführt.

5.1.4 Photonische Injektion von Ladungsträgern

Ladungsträger können in organischen Halbleitern nicht nur elektrisch sondern auch photonisch injiziert werden. Da beide in dieser Arbeit verwendeten Halbleiter im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts absorbieren, kann durch eine Handhabung der Transistoren an Licht ein Einfluss auf die intrinsische Ladungsträgerkonzentration vorhanden sein. Im verwendeten Labor standen sowohl Weiß- als auch Gelblicht zur Verfügung, siehe Abbildung 5.8 (a). Das Absorptionsverhalten der beiden Halbleiter ist in Abbildung 5.8 (b) dargestellt.

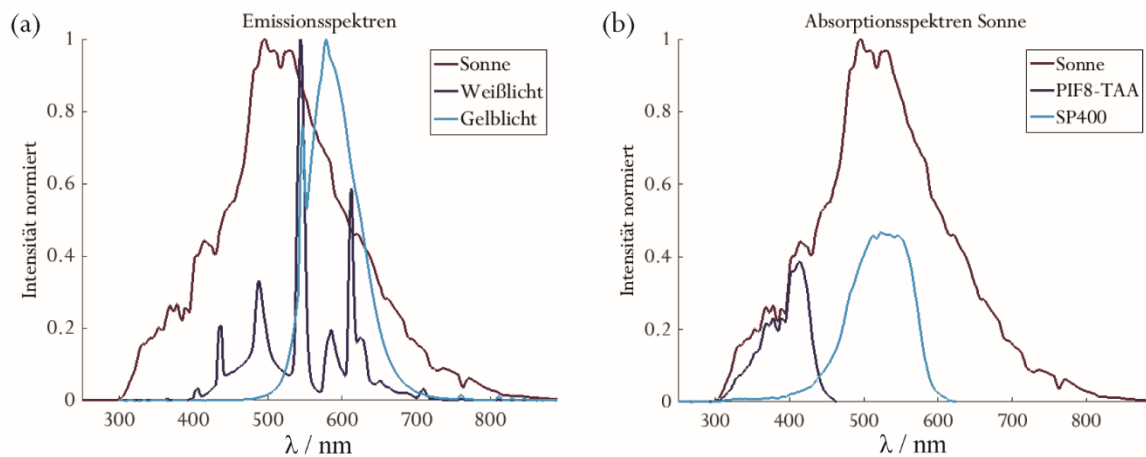


Abbildung 5.8: Emissionsspektren (auf das gemessene Maximum normierte Intensität in Abhängigkeit der Wellenlänge λ) der Sonne sowie der verwendeten Gelblicht- und Weißlichtlampen (a) und Absorptionsspektren der Halbleiter PIF8-TAA (Schichtdicke 146 nm) und SP400 (Schichtdicke 41 nm) aus dem Spektrum des Sonnenlichts sowie zugehöriges Emissionspektrum der Sonne (b). Die Absorptionsspektren sind normiert auf die maximale Intensität des Sonnenspektrums. Alle Messungen wurden durchgeführt mit einem Spektrometer Nanocalc 2000 der Fa. OceanOptics, Inc. (Software: NC_10nk, Version 4.0.7.0).

Durch eine erhöhte intrinsische Ladungsträgerkonzentration werden Fallenzustände bereits vor der Messung besetzt. Höherenergetische und für das Hopping günstigere Zustände können dadurch

leichter besetzt werden, die Leitfähigkeit des Kanals steigt. Die durch den Rechteckpuls zusätzlich injizierten Ladungsträger können sich hierdurch schneller und in größeren Mengen bewegen.

Die Auswirkungen beider Lichtquellen wurden in Form einer permanenten Beleuchtung (Offen) und in Form einer einmaligen kurzzeitigen Beleuchtung (Geschlossen) untersucht. Für letztere waren die Proben nur während des Kontaktierens dem Licht ausgesetzt und wurden umgehend durch Verschließen des Transistormessplatzes vom Licht ausgeschlossen. Die Bezeichnungen *offen* und *geschlossen* beziehen sich somit auf den Zustand des Transistormessplatzes. Messungen wurden durchgeführt nach 20 s und anschließend zehn Mal nach jeweils 60s. Der Transistor war während der ganzen Messdauer permanent den Rechteckpulsen ausgesetzt.

Zunächst werden die Auswirkungen der photonischen Injektion von Ladungsträgern für den Halbleiter PIF8-TAA anhand der ansteigenden Flanke *Rise* dargestellt. Betrachtet wird die Kontaktierung unter Gelblicht unter anschließendem Lichtausschluss (GG – geschlossen gelb), die Kontaktierung sowie Messung unter Gelblicht (OG – offen gelb) und die Kontaktierung sowie Messung unter Weißlicht (OW – offen weiß). Es sei darauf hingewiesen, dass alle Messungen bei einer Gate-Spannung von 10 V durchgeführt wurden, d.h. Ladungsträger bereits im Kanal akkumuliert waren.

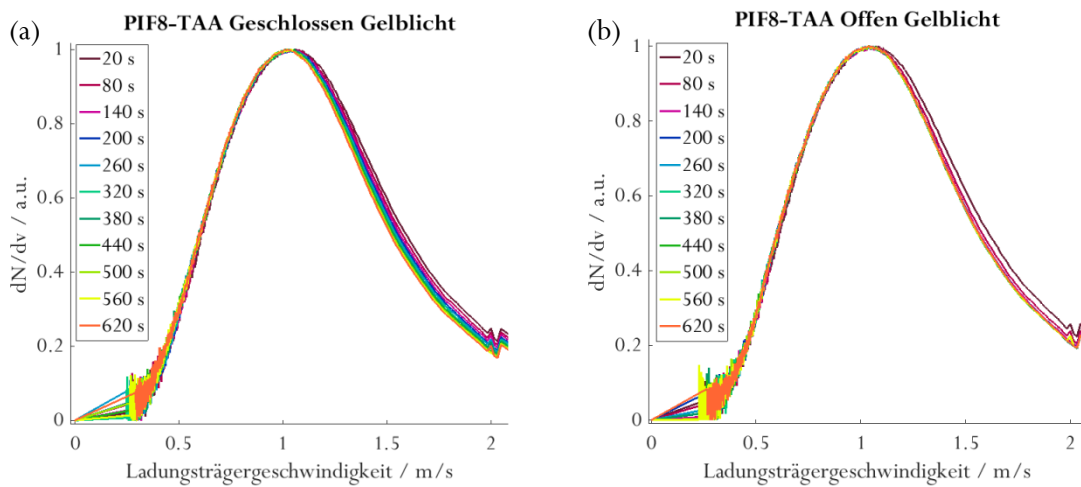


Abbildung 5.9: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen des PIF8-TAA-Transistors 0446#32²⁰ in Abhängigkeit von der Zeit unter Lichtausschluss (a) und bei Beleuchtung unter Gelblicht (b).

Abbildung 5.9 zeigt die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen des Transistors 0446#32²⁰ mit 25 μm Kanallänge unter Lichtausschluss (a) und unter dauerhafter Beleuchtung mit Gelblicht (b). Unter Lichtausschluss verschiebt sich die Verteilung mit zunehmender Messzeit t_m zu

²⁰ Probe PIF8-TAA - 0446#32: Halbleiter Spin-Coating bei 2500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess
Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

niedrigeren Geschwindigkeiten hin und die *Breite der Verteilung* B_{50} nimmt ab. Dieser Trend kann für die permanente Beleuchtung nicht beobachtet werden.

Die Verschiebung zu niedrigeren Geschwindigkeiten kann außerdem anhand der *Transitzeiten* t_{tr} in Abbildung 5.10 (a) gezeigt werden. Unter Ausschluss von Licht steigt die *Transitzeit* t_{tr} mit zunehmender Messzeit t_m an, d.h. die schnellsten Ladungsträger benötigen mehr Zeit bis sie an Drain erfasst werden können. Unter permanenter Beleuchtung stellt sich ein Wert um $15 \mu s$ ein. In Abbildung 5.10 (b) sind außerdem die *Halbwertsbreiten* B_{50} beider Messungen vergleichend dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sie bis 200 s den gleichen Verlauf nehmen. Ab 260 stagniert die *Breite der Verteilung* B_{50} für OG, während sie für GG weiter abnimmt. Dies bedeutet, dass unter Lichtausschluss das Spektrum der Ladungsträgergeschwindigkeiten mit zunehmender Messzeit t_m kleiner wird und allgemein mehr langsame Ladungsträger verzeichnet werden. Permanente Beleuchtung mit Gelblicht kompensiert diesen Effekt.

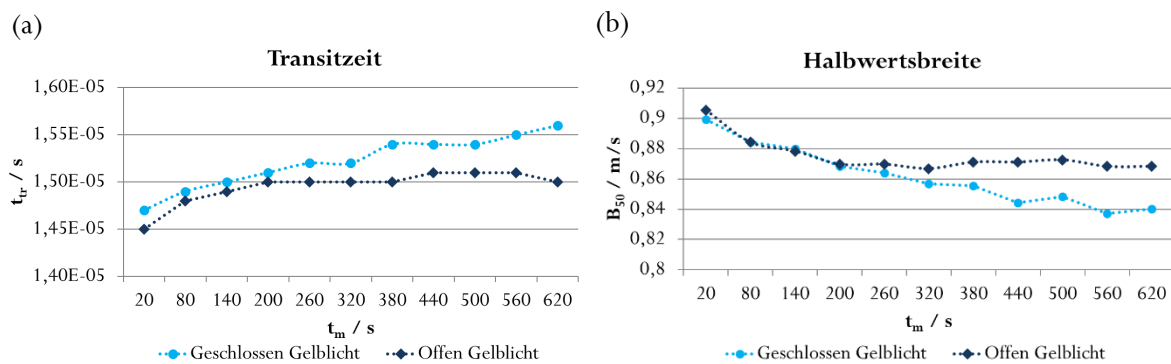


Abbildung 5.10: Transitzeit t_{tr} (a) und Halbwertsbreite B_{50} (b) und in Abhängigkeit der Zeit t für eine Messung unter Beleuchtung mit Gelblicht bzw. unter Lichtausschluss für den Halbleiter PIF8-TAA (Transistor 0446#32²⁰).

Bei Analyse der extrahierten *Anzahl an Ladungsträgern* N_{LT} , welche aus der Fläche unter der Verteilung ermittelt werden, ergibt sich, dass unter Lichtausschluss die *Anzahl an Ladungsträgern* N_{LT} mit fortschreitender Messzeit abnimmt, während sie sich unter permanenter Beleuchtung mit Gelblicht wieder ab 200 s um einen konstanten Wert ($\sim 2,3 \cdot 10^7$) einpendelt, siehe Abbildung 5.11. Interessanterweise wird bei einem permanenten Aussetzen mit Weißlicht ein Anstieg bis etwa 140 s beobachtet und dann ein fast konstanter Wert ($3,7 \cdot 10^7$), welcher ungefähr $1,4 \cdot 10^7$ höher liegt als unter Bestrahlung mit Gelblicht. Offensichtlich vermögen beide Arten der Beleuchtung die Anzahl an Ladungsträgern N_{LT} ab einer Messezeit t_m von 200 s konstant zu halten. Jedoch ist bis dahin bei Weißlicht eine Zunahme und hingegen bei Gelblicht eine Abnahme zu beobachten. PIF8-TAA absorbiert also in Wellenlängenbereichen, in denen Weißlicht zusätzlich zu den intrinsisch vorhandenen Ladungsträgern

noch weitere Ladungsträger injizieren kann bevor sich ein konstanter Wert einstellt. Bei Gelblicht findet aus Dunkelheit zunächst eine zusätzliche Injektion statt (Wert bei 20 s), welche geringer ausfällt als bei Weißlicht und mit zunehmender Zeit sinkt (GG) bzw. sich ebenfalls einpendelt (OG).

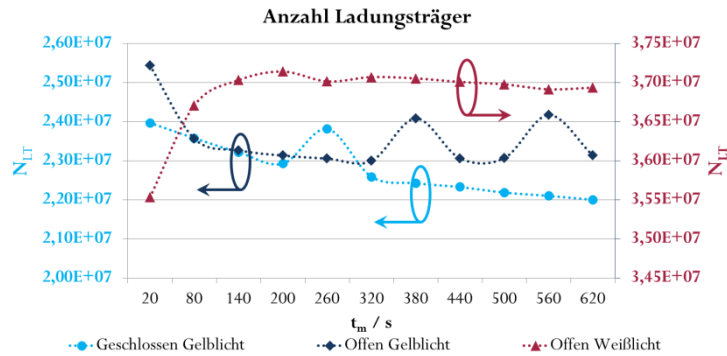


Abbildung 5.11: Anzahl der ermittelten Ladungsträger N_{LT} in Abhängigkeit der Messzeit t_m für den Halbleiter PIF8-TAA (Transistor 0446#32²⁰). Die Messungen fanden unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen statt. Die Ausreißer bei Geschlossen-Gelblicht (GG) 260 s sowie bei Offen-Gelblicht (OG) 380 und 560 s sind auf eine notwendige Anpassung der Integrationsgrenzen aufgrund hohen Messrauschens zurückzuführen.

Für den Halbleiter SP400 wird der Einfluss der Beleuchtung ohne angelegte Gate-Spannung untersucht. Die Anreicherung der Ladungsträger erfolgt somit rein photonisch. Die zugehörigen Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen des Transistors 0471#22²¹ sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Bei Vergleich mit den Verteilungen des Halbleiters PIF8-TAA ist zu beachten, dass es sich hier nicht um die normierte Darstellung handelt. Die nicht-normierte Darstellung wurde gewählt, um die Verschiebung der Höhe des Verteilungsmaximums mit zunehmender Messzeit zeigen zu können. Abbildung 5.12 (a) zeigt, dass unter Lichtausschluss sowohl die Höhe des Verteilungsmaximums als auch die Gesamtfläche, welche der *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} entspricht, mit zunehmender Zeit sinken. Unter Lichteinfluss hingegen, siehe Abbildung 5.12 (b), nehmen sowohl die Höhe des Verteilungsmaximums als auch die Fläche, zu, siehe auch Abbildung 5.13 (a). Ebenfalls verschiebt sich das Verteilungsmaximum zu kleineren bzw. größeren Ladungsträgergeschwindigkeiten hin, siehe Abbildung 5.13 (b). Interessanterweise ändert sich nur der Fronting-Bereich der Verteilung, d.h. der Bereich der Ladungsträgergeschwindigkeiten größer der Geschwindigkeit am Verteilungsmaximum.

²¹ Probe SP400 - 0471#22: Halbleiter Spin-Coating bei 2500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für einen einzelnen Transistor.

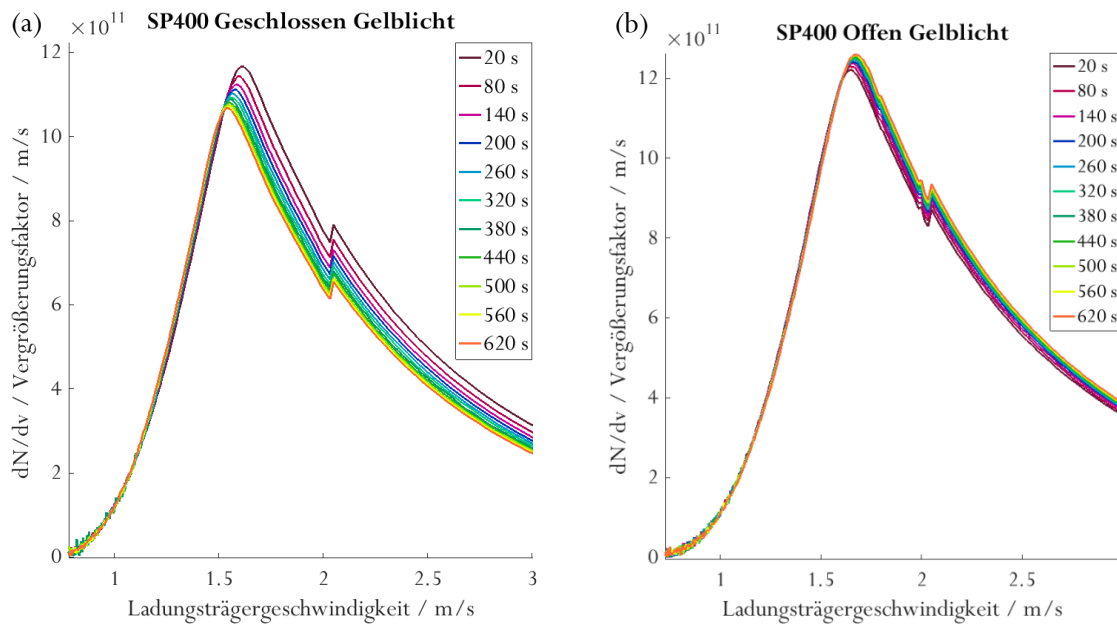


Abbildung 5.12: Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen als Funktion der Messzeit t_m unter Lichtausschluss (a) und unter Beleuchtung mit Gelblicht (b) als Funktion der Zeit. Es handelt sich hier um den SP400-Transistor 0471#22²¹ mit 25 µm Kanallänge. Es ist zu beachten, dass in dieser Darstellung die Werte der Verteilung noch den Vergrößerungsfaktor enthalten. Um auf die Größe „Anzahl Ladungsträger pro Geschwindigkeit“ gemessen in $1/(\text{ms}^{-1})$ herunter zu brechen ist somit eine Division durch den Vergrößerungsfaktor nötig, siehe Abschnitt 3.2.2.2 Gleichung 3.25.

Unter Lichtausschluss sinkt somit die Leitfähigkeit des Kanals, welche durch die anfänglich photonisch injizierten Ladungsträger aufgebaut wurde, kontinuierlich ab. Bei permanenter Beleuchtung werden zunehmend Ladungsträger in den Halbleiter injiziert, die Zustände besetzen und somit zur Leitfähigkeit des Kanals beitragen. Dies spiegelt sich auch in den Transitzeiten t_{tr} wider, siehe Abbildung 5.13 (c). Hier ist allerdings zu beachten, dass der Effekt in dem von Licht abgeschirmten System größer ist ($\Delta_{600s} = 0,8 \mu\text{s}$), als in jenem, das dem Licht ausgesetzt war ($\Delta_{600s} = 0,2 \mu\text{s}$). In letzterem gelangt man sogar an die Auflösungsgrenze der Messungen. Der Unterschied zwischen den Transitzeiten ist so gering, dass er nicht detektiert werden kann.

Für beide Halbleiter hängt die Ladungsträgergeschwindigkeit somit von den photonisch injizierten Ladungsträgern ab. Der Einfluss dieser kann durch Anlegen einer Gate-Spannung kompensiert werden. Prinzipiell wirkt das Anlegen einer Gate-Spannung ähnlich. Allerdings wirkt die photonische Injektion lateral an jeder Stelle gleichermaßen, während das Anlegen einer Gate-Spannung ein Feld über Source aufbaut.

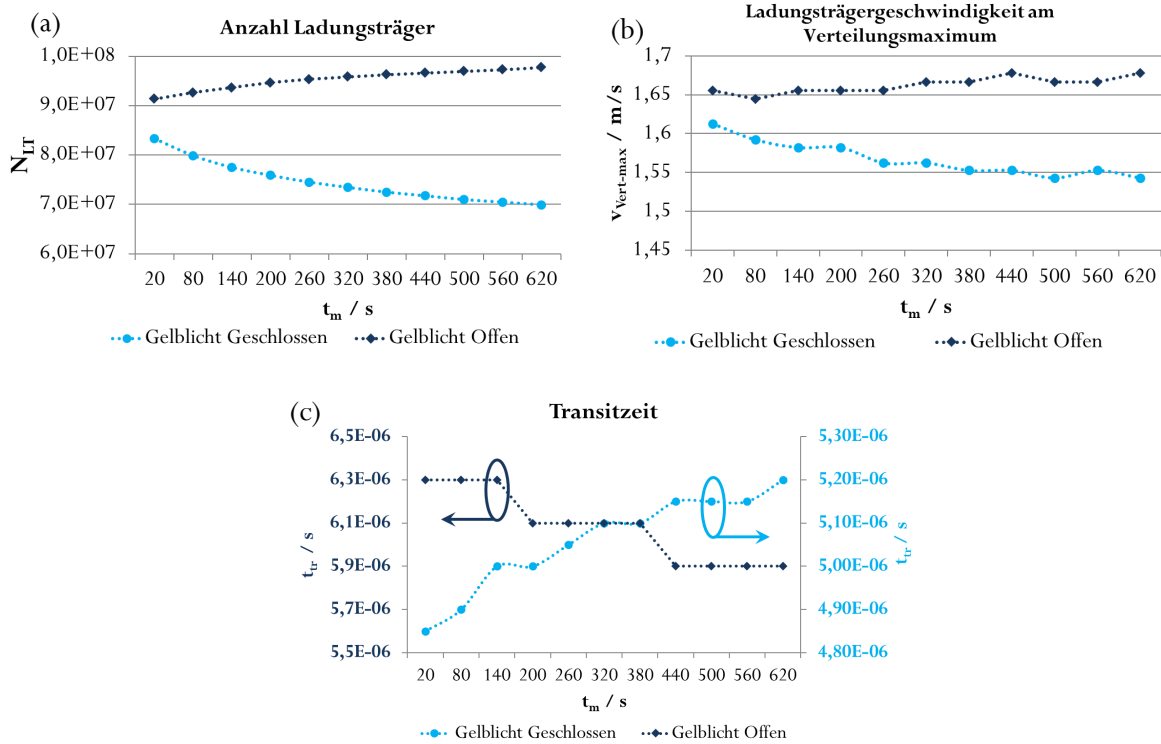


Abbildung 5.13: Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (a), Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ (b) sowie Transitzeit t_{tr} (c) in Abhängigkeit der Messzeit t_m bei Lichteinfluss (Offen) und unter Lichtausschluss (Geschlossen) für den Halbleiter SP400 (Transistor 0471#22²¹).

5.1.5 Prozessschwankungen

Nach der Untersuchung des Einflusses der Eingangsparameter und nach Auswahl derselben sollen nun die durch die händische Herstellung gegebenen Schwankungen, siehe Abschnitt 2.3, analysiert werden. Dies erfolgt anhand der Abweichungen der extrahierten Parameter der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung von identisch hergestellten Proben. Hierfür werden zwei identisch hergestellte Proben eines Versuchstages mit einer ebenso hergestellten Probe eines anderen Versuchstages verglichen. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich – im Gegensatz zu den in den vorangehenden Abschnitten durchgeführten Messungen an einzelnen Transistoren – bei dem Begriff „Proben“ um Substrate handelt, auf denen 4 Transistoren für diese Messungen ausgewählt wurden. Die dargestellten Werte werden aus den gemittelten Messdaten dieser 4 Transistoren gewonnen. Dies entspricht der in dieser Arbeit üblichen Vorgehensweise, siehe Abschnitt 3.2.2.2. Bei allen Proben wurde der Halbleiter im Tiefdruck prozessiert. Die zugehörigen Prozessparameter finden sich in Tabelle 5.5.

Tabelle 5.5: Prozessparameter der Proben zur Ermittlung der Prozessschwankungen, siehe auch Abschnitt 4.6.2 für den Druck des Halbleiters mit dem GT+W Superproofer sowie Abschnitt 4.5 für den Referenzprozess des Dielektrikums#B.

	PIF8-TAA	SP400
Lineatur	80 L/cm	140 L/cm
Stichelwinkel	140°	140°
Flächendeckung	80%	100%
Layout	Vollfläche	Einzeltransistoren
Druckrichtung zum Kanal	senkrecht	parallel
Druckgeschwindigkeit	3 m/s	5 m/s
Presseurdruck	16 mN/mm (50 mm)	16 mN/mm (50 mm)
Dielektrikum#B	Spin-Coating 1400 rpm	Spin-Coating 1400 rpm

5.1.5.1 Prozessschwankungen des Halbleiters PIF8-TAA

Für den Halbleiter PIF8-TAA werden die Proben 0438 (Tag1 A) und 0439 (Tag1 B) des selben Versuchstages sowie die Probe 0485 (Tag2) eines weiteren Versuchstages gewählt.

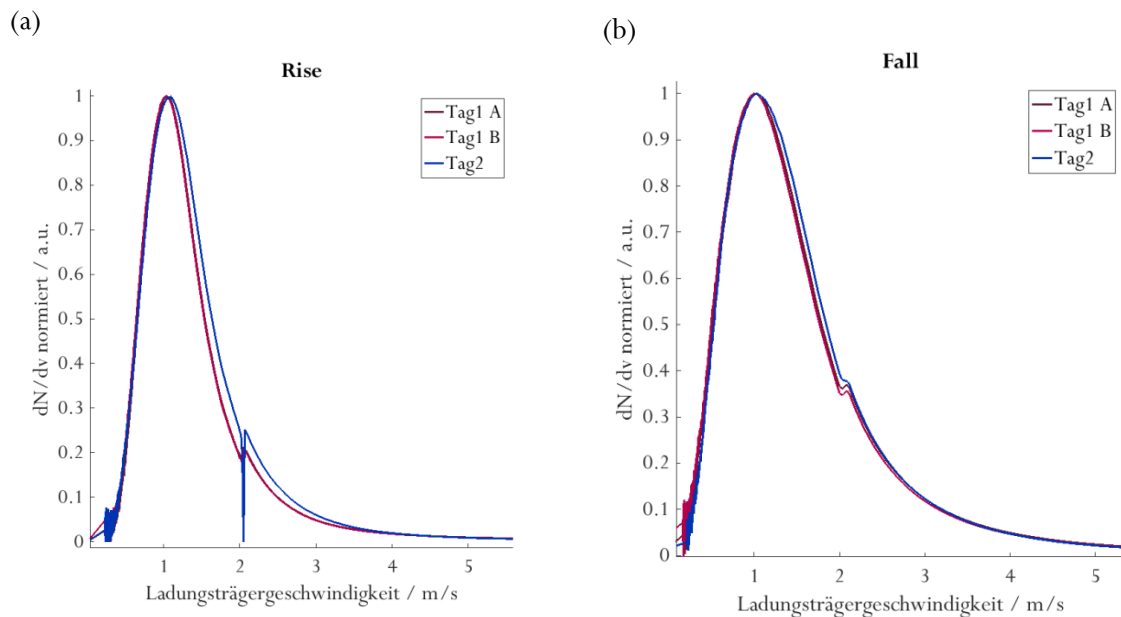


Abbildung 5.14: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der 25 µm-Transistoren der Proben 0438, 0439 und 0485. 0438 und 0439 wurden am selben Tag hergestellt, 0485 an einem weiteren Tag. Für *Rise* ist in dieser Darstellung kein Unterschied der Proben von Tag 1 zu erkennen. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe.

Vergleicht man alle drei normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen der 25 μm Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA ergibt sich folgendes Bild: In Abbildung 5.14 erscheinen die beiden am selben Tag1 erstellten Proben nahezu identisch, die des weiteren Versuchstags weicht ab. Zum Vergleich der Kennwerte wurde die Abweichung zwischen minimalem und maximalem Wert sowohl für die Proben eines Versuchstages als auch für die Proben beider Versuchstage ermittelt. Die erhaltenen prozentualen Abweichungen sind in Tabelle 5.6 dargestellt. Abweichungen, die innerhalb dieser Prozentsätze liegen, sind somit nicht signifikant und können auf Schwankungen, die auf dem Herstellungsprozess an sich beruhen zurückgeführt werden. Analog zur Beobachtung aus Abbildung 5.14 sind die Abweichungen innerhalb eines Versuchstages kleiner als zwischen verschiedenen Versuchstagen.

Tabelle 5.6: Prozentuale Abweichung der Kennwerte zwischen Tag1 A und Tag1 B (innerhalb Versuchstag) und zwischen Tag1 A, Tag1 B und Tag2 (zwischen Versuchstagen) für 25 μm Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA. Für letztere wurde jeweils die größte Abweichung gewählt.

PIF8-TAA				
maximale prozentuale Abweichung vom ermittelten Maximalwert				
Parameter	innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	25 μm Rise	25 μm Fall	25 μm Rise	25 μm Fall
$v_{\text{Vert-max}}$	0,8	3,6	6,1	3,6
$v_{\text{Vert-start}}$	4,7	3,8	10,7	3,8
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	0,8	1,1	16,7	20,4
Halbwertsbreite B_{50}	2,1	0,7	10,3	3,9
Tailing bei 50 %	2,2	4,4	13,9	4,4
Transitzeit t_{tr}	2	3,3	8,6	5,7

Des Weiteren wurde die Signifikanz der Abweichungen untersucht. Wie in Abschnitt 3.2.2.2 beschrieben werden hierfür die minimalen und maximalen Kennwerte, die aus den Messdaten gewonnen wurden, als Konfidenzintervall für die Kennwerte der Mittelwertverteilung angenommen. Innerhalb eines Versuchstages ist bis auf die Transitzeit t_{tr} bei Fall keine signifikante Abweichung zu erkennen. An verschiedenen Versuchstagen kommt es zu mehreren signifikanten Abweichungen. So weisen die Abweichungen der *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$ und der *Transitzeit* t_{tr} bei *Rise* auf eine Verschiebung der Verteilung entlang der Abszisse hin, während die Abweichung in der *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} sowie der *Halbwertsbreite* B_{50} auf eine Abweichung in der Verteilungsform hinweisen.

Tabelle 5.7: Signifikanz der Kennwerte im Tagesvergleich der 25 μm -PIF8-TAA-Transistoren. Ein x symbolisiert keine signifikante Abweichung, ein o symbolisiert eine signifikante Abweichung. Die Werte für den Start der Verteilung konnten bei *Rise* nicht ohne Anpassung der Grenzwerte extrahiert werden und wurden somit der Bewertung entzogen.

PIF8-TAA				
Parameter	Signifikanz der Abweichung			
	innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	25 μm Rise	25 μm Fall	25 μm Rise	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	x	x	o	x
$V_{\text{Vert-start}}$	/	x	/	x
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	x	x	x	o
Halbwertsbreite B_{50}	x	x	x	o
Transitzeit t_{tr}	x	o	o	x

Abbildung 5.15 zeigt die normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der 10 μm -Transistoren. Optisch ist bei dieser Auflösung kein Unterschied zwischen den Verteilungen erkennbar.

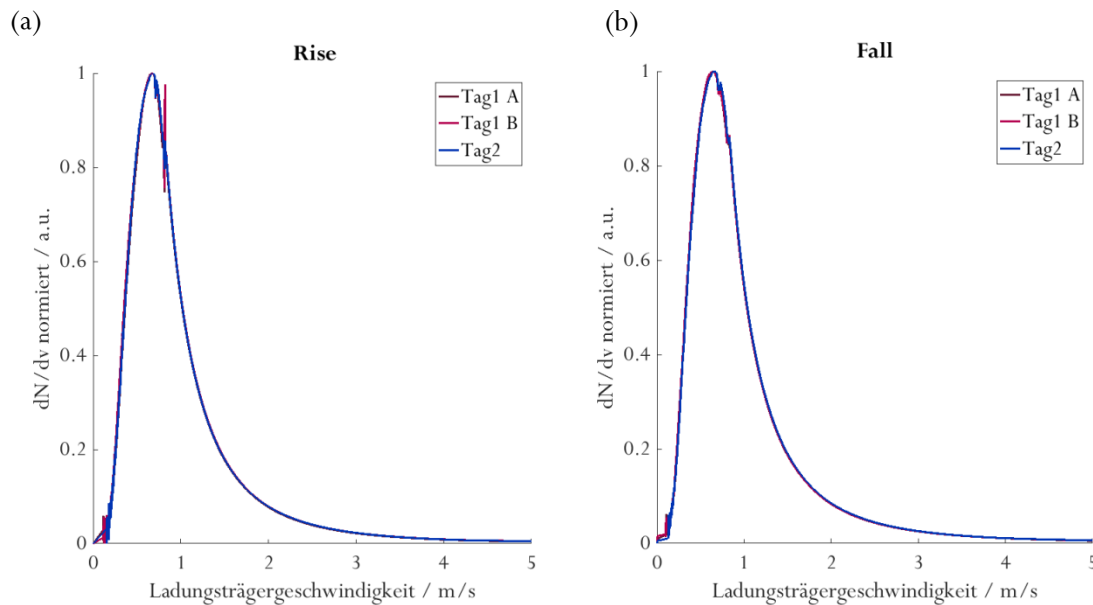


Abbildung 5.15: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* (a) und der abfallenden Flanke *Fall* (b) für identische hergestellte Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA mit 10 μm Kanallänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Herstellung (Proben: 0438 – Tag1 A, 0439 – Tag1 B, 0485 – Tag2 A).

Tabelle 5.8: Prozentuale Abweichung der Kennwerte zwischen Tag1 A und Tag1 B (innerhalb Versuchstag) und zwischen Tag1 A, Tag1 B und Tag2 (zwischen Versuchstagen) für 10 μm Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA. Für letztere wurde jeweils die größte Abweichung gewählt.

PIF8-TAA				
maximale prozentuale Abweichung vom ermittelten Maximalwert				
Parameter	innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	10 μm Rise	10 μm Fall	10 μm Rise	10 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	0,7	0	0,7	2,6
$V_{\text{Vert-start}}$	4,1	0	8,3	ALG
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	10,1	10,3	19,7	19,5
Halbwertsbreite B_{50}	2,1	0,5	2,1	0,9
Tailing bei 50 %	5,4	1,0	5,4	4,2
Transitzeit t_{tr}	2,9	7,3	4,2	7,3

Bei Betrachtung der prozentualen Abweichungen werden jedoch Unterschiede deutlich, siehe Tabelle 5.8. Bei Analyse der Signifikanz in Tabelle 5.9 zeigt sich, dass für Transistoren mit 10 μm Kanallänge auch schon innerhalb eines Versuchstages schon 2 signifikante Abweichungen identifiziert werden können. Diese liegen vor bei der *Verteilungsbreite* B_{50} in *Rise* und der *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} in *Fall*.

Tabelle 5.9: Signifikanz der Kennwerte im Tagesvergleich der 10 μm PIF8-TAA-Transistoren. Ein x symbolisiert keine signifikante Abweichung, ein o symbolisiert eine signifikante Abweichung.

PIF8-TAA				
Signifikanz der Abweichung				
Parameter	innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	10 μm Rise	10 μm Fall	10 μm Rise	10 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	x	x	x	o
$V_{\text{Vert-start}}$	x	x	o	x
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	x	o	o	o
Halbwertsbreite B_{50}	o	x	x	o
Transitzeit t_{tr}	x	x	o	x

Obwohl die Abweichung bei der Anzahl der Ladungsträger N_{LT} in der gleichen Größenordnung wie bei den 25 μm -Transistoren liegt ($\sim 20\%$), werden die Abweichungen aufgrund der sehr guten Übereinstimmung der Messdaten der Einzeltransistoren als signifikant deklariert. Aus einer hohen Übereinstimmung der Rohmessdaten resultiert ein geringes Konfidenzintervall. Diese sehr gute

Übereinstimmung könnte auf das Erreichen der Auflösungsgrenze zurückzuführen sein. Unterschiede können nicht mehr angezeigt werden, das sie sich im Bereich $< 0,1 \mu\text{s}$ bewegen.

Von weiterem Interesse ist der Vergleich der Kennwerte für die ansteigende und die abfallende Flanke. Zur vereinfachten Darstellung werden diese ins Verhältnis zueinander gesetzt, welches für die Transitzeit t_{tr} dem Faktor α entspricht, siehe Abschnitt 3.1.4.3. Die Ergebnisse sind Tabelle 5.10 zu entnehmen. Die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{vert-max}$ ist für beide Flanken nahezu identisch. Durch das Vorspannen des Kanals sind die niederenergetischen Zustände bereits befüllt. Die Besetzungs- und Entleerungsdauer der höher energetischen Zustände ist somit um die gleiche Geschwindigkeit verteilt. Auch das Verhältnis für die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} ist in etwa 1. Dies bedeutet, dass die Relaxationszeit nach Abschalten des Transistors lange genug ist um die zusätzlich eingebrachten Ladungsträger wieder vollständig abzugeben. Bezüglich der *Verteilungsbreite* B_{50} ergeben sich für die beiden gewählten Kanallängen unterschiedliche Verhältnisse. Bei den Transistoren mit $25 \mu\text{m}$ Kanallänge ist die Verteilung für *Fall* um Faktor 1,4 breiter. Außerdem weist *Fall* ein stärkeres Fronting (Verhältnis der gemittelten Werte für Fronting zu Tailing $r_{fr/tl} = 1,3$) als *Rise* ($r_{fr/tl} = 1,1$) auf. Ein Fronting der ansteigenden Flanke kann auf den zeitlichen Mehraufwand aufgrund der Ausbildung der Leitungspfade der ansteigenden Flanke zurückzuführen sein. Die Leitungspfade werden ausgebildet, indem durch die von außen wirkenden Potentiale Ladungsträger in den Halbleiter injiziert werden. Diese Ladungsträger besetzen zunächst niederenergetische Zustände in ihrer Umgebung. Hierdurch steigt die Gesamtenergie des Systems und höhere Zustände können besetzt werden. Die Hopping-Wahrscheinlichkeit steigt. So erfolgt ein segmentweises Besetzen der Zustände entlang der Grenzfläche von Halbleiter und Dielektrikum von Source nach Drain, richtungsabhängig getrieben durch die Gate- bzw. Drain-Spannung. Ist der Transistor bereits vorgespannt, sind zahlreiche Zustände bereits besetzt. Es erfolgt lediglich die Ausbildung eines wahrscheinlich bereits geebneten Pfades in Richtung Drain. Ein Fronting steht für eine Vielzahl an schnellen Ladungsträgern. Dies könnte auf die Ausbildung verschiedenster Pfade zurückzuführen sein bis sich ein Hauptpfad herauskristallisiert hat. Ein Fronting in der abfallenden Flanke ($r_{fr/tl} = 1,3$) ist möglicherweise auf die erhöhte Mobilität aufgrund der angelegten Gate-Spannung zurückzuführen. Dadurch existieren viele Ladungsträger in höher energetischen Zuständen, die schnell in Drain entladen werden können. Das Breitenverhältnis für die $10 \mu\text{m}$ Transistoren von 0,94 sowie ein Gütefaktor α von 1,31²² ist wahrscheinlich auf das Erreichen der Auflösungsgrenze zurückzuführen. Für $25 \mu\text{m}$ Transistoren beträgt der Gütefaktor $\alpha = 0,81$. Die längere Transitzeit t_{tr} für *Rise* ist auf die Ausbildung des Kanals zurückzuführen. Dies ist für eTOF-Messungen

²² Es ist anzumerken, dass α per Definition zwischen Null und Eins liegen sollte, siehe Abschnitt 3.1.4.3.

ohne vorgespanntes Gate bereits in der Literatur dokumentiert, siehe Abschnitt 3.1.4.3. Einem α von eins schreibt man eine perfekte Grenzfläche zwischen Halbleiter und Dielektrikum zu.

Tabelle 5.10: Verhältnis *Fall/Rise* der aus Tag1 A, Tag1 B und Tag2 gemittelten Kennwerte für Transistoren des Halbleiter PIF8-TAA.

PIF8-TAA		
Verhältnis der gemittelten Kennwerte von Fall zu Rise		
Parameter	10 μm	25 μm
$V_{\text{Vert-max}}$	$1,04 \pm 0,01$	$0,97 \pm 0,02$
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	$0,987 \pm 0,002$	$1,01 \pm 0,02$
Halbwertsbreite B_{50}	$0,94 \pm 0,01$	$1,41 \pm 0,04$
Transitzeit t_{tr}	$1,31 \pm 0,03$	$0,81 \pm 0,01$

5.1.5.2 Prozessschwankungen für den Halbleiter SP400

Für den Halbleiter SP400 wurden die Proben 0459 (Tag1 A) und 0460 (Tag1 B) als Proben des gleichen Herstellungstages sowie die Probe 0490 (Tag2) als Probe eines weiteren Versuchstages gewählt. Anzumerken ist hier, dass die Probe 0490 mit einem abweichenden Drucklayout gedruckt wurde. Es wurde eine Vollfläche an Stelle von Einzelstrukturen verwendet. Durch die Verwendung einer Vollflächendruckform ist das Substrat vollständig mit Halbleiter bedeckt. Es könnten sich somit alternative Leitungspfade ausbilden, die sich in der Existenz eines Off-Stromes zeigen (Grau, 2016).

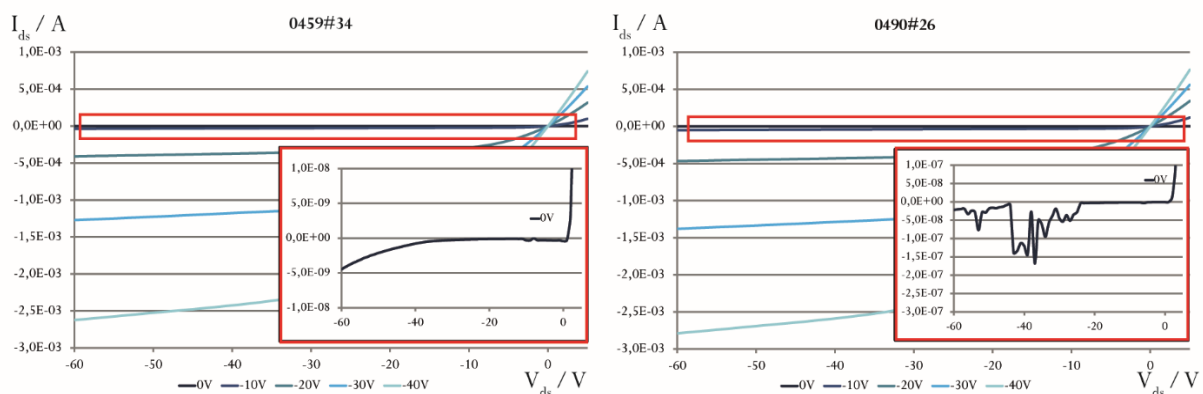


Abbildung 5.16: Ausgangskennlinien eines strukturiert prozessierten Transistors (0459) sowie eines vollflächig gedruckten Transistors (0460). Der Einschub zeigt die 0 V-Kennlinie in höherer Auflösung. Die Off-Strome bewegen sich für ersteren im Bereich < 5 nA, für letzteren im Bereich < 150 nA.

In Abbildung 5.16 sind exemplarisch die Ausgangskennlinien eines strukturiert prozessierten Transistors von Tag 1 A (0459) und die eines vollflächig prozessierten Transistors von Tag 2 (0490) dargestellt. Die 0V-Kennlinie repräsentiert den Off-Strom, da sie dem Stromfluss im ausgeschalteten Zustand entspricht. Für den strukturiert gedruckten Transistor werden Ströme von maximal 5 nA erreicht, für den vollflächig gedruckten liegen diese um Faktor 30 höher. Dennoch sind beide Ströme bei einem vorwiegend auftretenden Kanalstrom im Bereich von Milliampere mit einem Faktor von 10^5 - 10^6 vernachlässigbar klein.

Für die Transistoren mit 10 μm Kanallänge stößt man mit den gegebenen Prozessparametern in manchen Fällen an die Auflösungsgrenze des am Oszilloskop gewählten Messfensters. Werte können nicht mehr unterschieden werden. Von einem Erreichen dieser Grenze wird ausgegangen, wenn die Messwerte, sowie deren gemittelte Werte bis auf die fünfzehnte Nachkommastelle übereinstimmen. In Tabelle 5.11 und Tabelle 5.12 sind die Abweichungen innerhalb eines Versuchstages sowie zwischen den Versuchstagen der Transistoren mit 10 μm Kanallänge dargestellt. Die extrahierten Parameter innerhalb eines Versuchstages weichen für keinen von ihnen signifikant voneinander ab. Zwischen Proben desselben Versuchstages kann somit nicht unterschieden werden. Zwischen den Versuchstagen weichen vor allem bei der ansteigenden Flanke die Kennwerte voneinander ab. Dieses Bild bestätigt sich für die 25 μm Transistoren, siehe Tabelle 5.13 sowie Tabelle 5.14.

Tabelle 5.11: Prozentuale Abweichung der Kennwerte für 10 μm Transistoren von Halbleiter SP400.

SP400				
maximale prozentuale Abweichung vom ermittelten Maximalwert				
Parameter	innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	10 μm Rise	10 μm Fall	10 μm Rise	10 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	1,6	0,0	1,6	0,0
$V_{\text{Vert-start}}$	/	0,0	8,3	63,6
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	12,4	13,0	33,1	33,9
Halbwertsbreite B_{50}	0,7	0,8	3,5	0,8
Tailing bei 50 %	2,8	1,6	2,8	1,5
Transitzeit t_{tr}	4,0	0,0	44,0	0,0

Tabelle 5.12: Signifikanz der Kennwerte im Tagesvergleich der 10 μm SP400-Transistoren. Ein x symbolisiert keine signifikante Abweichung, ein o symbolisiert eine signifikante Abweichung. Der Vermerk ALG weist auf das Erreichen der Auflösungsgrenze hin.

SP400				
Parameter	Signifikanz der Abweichung innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	10 μm Rise	10 μm Fall	10 μm Rise	10 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	x	x (ALG)	x	x (ALG)
$V_{\text{Vert-start}}$	/	x	x	o
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	x	x	o	o
Halbwertsbreite B_{50}	x	x	o	x
Transitzeit t_{tr}	x	x (ALG)	o	x (ALG)

Tabelle 5.13: Prozentuale Abweichung der Kennwerte für 25 μm Transistoren von Halbleiter SP400.

SP400				
Parameter	maximale prozentuale Abweichung vom ermittelten Maximalwert innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	25 μm Rise	25 μm Fall	25 μm Rise	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	0,0	0,0	4,5	2,2
$V_{\text{Vert-start}}$	4,0	3,8	92,0	57,7
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	8,5	8,3	30,7	31,8
Halbwertsbreite B_{50}	2,0	1,9	2,0	4,3
Tailing bei 50 %	5,1	0,0	4,8	6,4
Transitzeit t_{tr}	5,0	2,4	16,7	9,5

Tabelle 5.14: Signifikanz der Kennwerte im Tagesvergleich der 25 μm SP400-Transistoren. Ein x symbolisiert keine signifikante Abweichung, ein o symbolisiert eine signifikante Abweichung. Der Vermerk ALG weist auf das Erreichen der Auflösungsgrenze hin.

SP400				
Parameter	Signifikanz der Abweichung innerhalb Versuchstag		zwischen Versuchstagen	
	25 μm Rise	25 μm Fall	25 μm Rise	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	x (ALG)	x (ALG)	o	o
$V_{\text{Vert-start}}$	x	x	o	o
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	x	x	o	o
Halbwertsbreite B_{50}	x	x	x	x
Transitzeit t_{tr}	x	x	o	o

In Abbildung 5.17 (a) und (b) ist die Abweichung der Verteilung von Tag2 im Vergleich zu den beiden Proben von Tag1 dargestellt. Im Fall von *Rise* drückt sich die Abweichung durch eine Verschiebung der Verteilung entlang der Abszisse aus. Im Fall von *Fall* ist diese weniger stark ausgeprägt. Des Weiteren ist die Verteilung der abfallenden Flanke breiter als der ansteigenden. Während *Fall* annähernd symmetrisch ist (Verhältnis der Mittelwerte von Fronting/ Tailing = 1,0), weist *Rise* ein starkes Fronting auf (Verhältnis der Mittelwerte von Fronting/ Tailing = 1,6). Diese symmetrische Verteilung könnte auf eine statistische Verteilung (Gauss) der Detrapping-Wahrscheinlichkeit hinweisen.

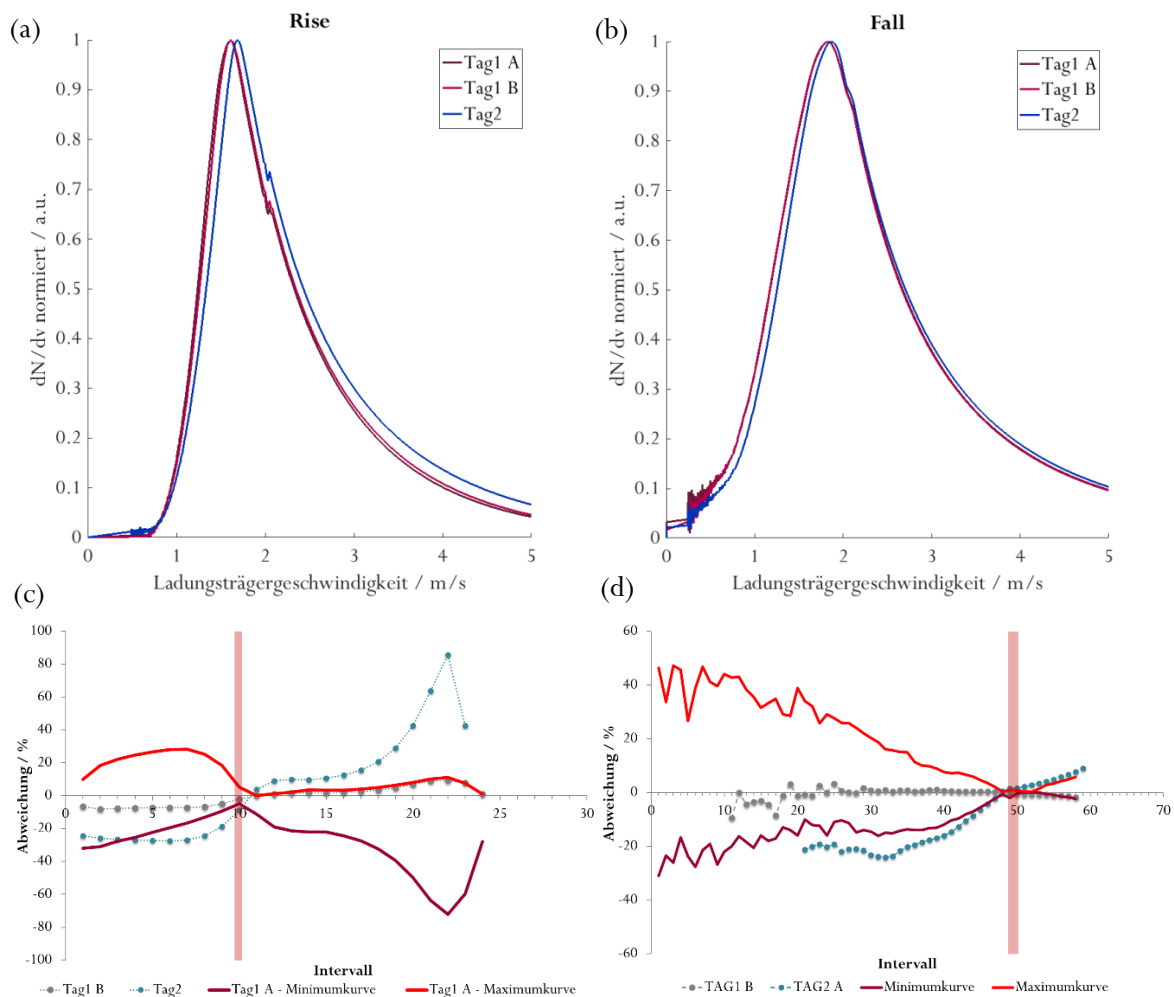


Abbildung 5.17: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der 25 μm Transistoren des Halbleiters SP400 (Proben 0459-Tag1 A, 0460-Tag1-B und 0490-Tag2 A) für *Rise* (a) und *Fall* (b) sowie die zugehörigen Abweichungsanalysen für *Rise* (c) und *Fall* (d). Die Verteilungen von Tag2 weichen stets signifikant von den beiden anderen Verteilungen ab.

Aus der Abweichungsanalyse, siehe Abbildung 5.17 (c) und (d), ergibt sich, dass die Proben des gleichen Versuchstages nicht unterscheidbar sind und die Probe des weiteren Versuchstages stets signifikant abweicht. Für die Transistoren mit 10 μm Kanallänge kann weder optisch anhand der Verteilung noch

anhand der Abweichungsanalyse eine signifikante Abweichung erkannt werden, siehe Abbildung A4. Dies ist vermutlich auf das Erreichen der Auflösungsgrenze zurückzuführen.

Vergleicht man die extrahierten Kennwerte für *Rise* und *Fall* so ergeben sich folgende Zusammenhänge: Die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$ ist für *Rise* geringer. Dies ist auf das langsamere Befüllen der unbesetzten Zustände und die damit verbundene Ausbildung des Kanals zurückzuführen und spiegelt sich auch in der Transitzeit t_{tr} wider. Diese Beobachtung wurde bereits in der Literatur dokumentiert, siehe Abschnitt 3.1.4.3. Hier ist ein Verhältnis der Transitzeiten von *Rise* ($t_{\text{tr,on}}$) zu *Fall* ($t_{\text{tr,off}}$) von drei dokumentiert (Sirringhaus, 2000). Im Fall des Halbleiters SP400 ergibt sich ein Verhältnis von 0,73. Die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} ist für die ansteigende und abfallende Flanke identisch. Dies bedeutet, dass das im gewählten Messfenster der Ursprungszustand wieder hergestellt werden kann und die gleiche Menge an injizierten Ladungsträgern das System wieder verlassen hat. Die Verhältnisse der Kennwerte sind in Tabelle 5.15 zusammengefasst.

Tabelle 5.15: Verhältnisse der gemittelten Kennwerte von *Fall* zu *Rise* für SP400-Transistoren.

SP400		
Verhältnis der gemittelten Kennwerte von Fall zu Rise		
Parameter	10 μm	25 μm
$v_{\text{Vert-max}}$	$1,06 \pm 0,01$ (ALG)	$1,12 \pm 0,01$
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	$0,989 \pm 0,005$	$0,984 \pm 0,008$
Halbwertsbreite B_{50}	$1,10 \pm 0,02$	$1,41 \pm 0,02$
Transitzeit t_{tr}	$1,1 \pm 0,3$ (ALG)	$0,73 \pm 0,03$

Aufgrund des häufigen Erreichens der Auflösungsgrenze bei Transistoren mit 10 μm Kanallänge, werden in den folgenden Abschnitten nur Transistoren mit 25 μm Kanallänge zur Auswertung herangezogen.

5.1.6 Interpretation der Kennwerte

In diesem Abschnitt wird das Modell hinter den Kennwerten der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung vorgestellt. Die Kennwerte dienen dazu, die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung in messbaren, quantitativen Größen zu beschreiben, siehe Abschnitt 3.2.2.2. Im Fokus stehen dabei der Zusammenhang der elektrischen und der prozessspezifischen Parameter, der in den, im nächsten Abschnitt, folgenden Versuchsreihen Anwendung findet. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass das Modell der Ladungsträgerlaufzeit ein phänomenologisches Modell ist. Die Bezeichnung Ladungsträgergeschwindigkeit wird symbolisch verwendet zur Beschreibung der Geschwindigkeit der Ausbreitung einer Ladungsdichte. In einem

bestimmten zeitlichen Messintervall ($0,1 \mu\text{s}$) wird eine bestimmte Anzahl an Ladungsträgern am Oszilloskop erfasst. Aus diesem Zeitpunkt wird durch Division von der Kanallänge eine Geschwindigkeit berechnet, die diesen Ladungsträgern zugeordnet wird.

Die *Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung* ist die Verteilung der detektierten Anzahl an Ladungsträgern über ihrer Geschwindigkeit, wobei sich die Geschwindigkeit aus der Kanallänge und dem Messintervall ergibt. Diesem Modell liegt also die Annahme zugrunde, dass der Strom im Kanal von Elektronen oder Löchern getragen wird und diese mit einer statistisch verteilten Geschwindigkeit v_{LT} durch den Kanal driften.

Die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{Vert-max}$ beschreibt die Geschwindigkeit – d. h. ein bestimmtes Messintervall, das in eine Geschwindigkeit transformiert wird – in der bis zum Erreichen der Sättigung die meisten Ladungsträger an Drain detektiert werden. Verschiebt sich das Verteilungsmaximum entlang der Geschwindigkeitsachse, so verschiebt sich im Allgemeinen die ganze Verteilung. Niedrige Ladungsträgergeschwindigkeiten weisen unter gegebenen Bedingungen auf Hindernisse im Transport hin. In organischen Halbleitern treten diese in Form von energetischer Unordnung und Fallenzuständen auf. Eine hohe Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum ist erstrebenswert. Sie bedeutet, dass mit diesem Transistor kurze Reaktionszeiten realisiert werden können.

Die *Verteilungsbreite* B_{50} beschreibt die Breite der Verteilung bei 50 % der Verteilungshöhe und ist ein Parameter für das vorliegende Spektrum an Ladungsträgergeschwindigkeiten. Sie ergibt sich aus der Dauer des Anstiegs der transienten Antwort bis diese in Sättigung geht und entspricht somit Anstiegszeit, der Burns bereits eine Proportionalität zur reziproken Mobilität vorausgesagt hatte, siehe Abschnitt 3.1.4.2. Prinzipiell entspräche eine möglichst schmale Verteilung der gewünschten Breite, da ein sehr steiler Anstieg der transienten Antwort eine Verbesserung in der Übertragung hochfrequenter Signalanteile bedingen würde. Allerdings geht in den vorliegenden Messungen mit hohen gemessenen Spannungsantworten auch eine höhere Anstiegszeit hervor, welche in breiteren Verteilungen resultiert. Dies kommt dadurch zustande, dass bei niedrigen transienten Antworten oft eine Verzögerungszeit bis zum Anstieg der Spannung auftritt. Diese Verzögerungszeit ist in der Anstiegszeit nicht enthalten. Auch in der Verteilung fehlt sie, da die Ableitung ohne ansteigenden Spannungswert null beträgt und diese in die Berechnung der Verteilung eingeht. Sie wird lediglich in der Transitzeit t_{tr} erfasst.

Einher mit der Verteilungsbreite geht die *Form der Verteilung*. Diese wird durch das Einteilen der Verteilung in einen Bereich der Geschwindigkeiten höheren Wertes als die des Verteilungsmaximums (Fronting) sowie in einen Bereich der Geschwindigkeiten niedrigeren Wertes als die des Verteilungsmaximums (Tailing) beschrieben. Die Verteilungen in dieser Arbeit weisen fast ausnahmslos ein Fronting auf. Der Bereich des Frontings beschreibt den Bereich der scheinbar hohen Ladungsträgersgeschwindigkeiten. In diesem Bereich werden die Zustände besetzt, durch die ein möglichst schneller Signaltransport stattfindet. Je größer das Fronting ist, desto mehr mögliche Pfade gibt es, entlang derer ein schnellerer Signaltransport möglich ist, im Vergleich zu jenen Pfaden, die im Durchschnitt größte Menge an Ladung passieren lassen. Im Bereich des Tailings werden vermehrt Fallenzustände besetzt, der Transport wirkt langsamer. Eine ideale Verteilung wäre Gauss-förmig. In diesem Fall wäre die detektierte scheinbare Ankunftszeit der Ladungsträger statistisch verteilt und frei von zeitlichen Verzögerungen wie dem Besetzen und Entleeren von Fallenzuständen.

Die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} ergibt sich aus der Fläche unter der Ladungsträgersgeschwindigkeitsverteilung. Sie stellt die Menge des geflossenen Stroms als Reaktion auf den Spannungspuls bis zum Erreichen der Sättigung im Falle der ansteigenden Flanke bzw. bis zum Abfall auf den Startwert im Falle der abfallenden Flanke dar. Je höher die Anzahl an Ladungsträgern, desto höher die Leitfähigkeit im Kanal. Eine hohe Anzahl ist somit erstrebenswert.

Die *Transitzeit* t_{tr} beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen dem Zeitpunkt, an dem der Rechteckpuls die Hälfte seiner Höhe erreicht hat, und dem Zeitpunkt, an dem die transiente Antwort die Hälfte ihrer Höhe erreicht hat. In ihrer ursprünglichen Definition wird die Transitzeit als die Zeit beschrieben, an der die ersten Ladungsträger an Drain detektiert werden, d. h. die kürzeste Zeit, die zur Signalausbreitung über eine Distanz L benötigt wird. Da dieser Zeitpunkt jedoch in den vorliegenden Messungen von Leitungsreflexionen überlagert ist, kann er nicht mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden. Die Transitzeit wird deshalb aus dem zeitlichen Abstand des Rechteckpulses und der Pulsantwort bei Erreichen von 50 % ihres Maximalwertes ermittelt, siehe Abschnitt 3.1.4.1. Der systematische Fehler, der hierdurch begangen wird, wird aufgrund des verringerten Messfehlers toleriert. Die Transitzeit wird dennoch – auch wenn dies aufgrund der Extraktionsmethode nicht korrekt ist – gemäß ihrer Definition als kürzeste Ladungsträgerlaufzeit interpretiert. Hohe Transitzeiten kommen zustande, wenn große Wege zurückgelegt werden müssen (stark verzweigte Leitungspfade) oder diese Wege von Fallenzuständen geprägt sind. Letztere kommen zustande durch Verunreinigungen

oder Schichtbildungsdefekte. Eine niedrige Transitzeit ermöglicht hohe Schaltfrequenzen und wird somit angestrebt.

Der Gütefaktor α beschreibt das Verhältnis der Transitzeit der abfallenden Flanke $t_{tr,off}$ zur Transitzeit der ansteigenden Flanke $t_{tr,on}$. Per Definition steht ein α von 1 für eine perfekte und ideale Grenzfläche, siehe Abschnitt 3.1.4.3. α liegt stets zwischen 0 und 1, d. h. die Transitzeit an der abfallenden Flanke ist stets kleiner als an der ansteigenden. Dies ist auf das zeitaufwändigere Befüllen der Zustände – im Vergleich zum Entleeren der offenbar seichten Zustände – bis zum Erreichen der Drain-Elektrode zurückzuführen. Je geringer α ist, desto größer ist die Auswahl an freien (Fallen-)Zustände im Kanal und desto schlechter ist seine Güte. Die Auswahl an diesen freien Zuständen kann auch äußerlich verringert werden, z. B. durch Anlegen einer Gate-Spannung. Hierdurch werden Ladungen an der Grenzfläche akkumuliert und Zustände dadurch vorab besetzt.

Die *statische* und die *dynamische Mobilität*, siehe auch Abschnitt 2.1.1.3, unterscheiden sich in der Art der Extraktion. Die statische Mobilität wird aus der Transferkennlinie extrahiert. Die dynamische Mobilität hingegen, wird aus der Transitzeit t_{tr} bzw. aus der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{vert-max}$ berechnet. Der statischen Mobilität wird die durchschnittliche Mobilität aller Ladungsträger in einem bereits ausgebildeten Kanal zugeschrieben, der dynamischen Mobilität, die der schnellsten Ladungsträger. Zusätzlich ist anzumerken, dass die statische Mobilität bei einer Gate-Spannung von -40 V ermittelt wird, die dynamische Mobilität im Falle des Halbleiters SP400 bei 0 V Gate-Spannung und im Falle des Halbleiters PIF8-TAA bei 10 V Gate-Spannung. Die Gate-Spannungsabhängigkeit der Mobilität ist somit bei der Interpretation zu beachten. In beiden Fällen ist eine hohe Mobilität der Ladungsträger zu bevorzugen.

5.2 Dynamisches und Statisches Verhalten gedruckter OFETs

Im Folgenden wird das statische und dynamische Verhalten gedruckter OFETs in Abhängigkeit bestimmter Prozessparameter untersucht. In diesem Rahmen werden die Begriffe *dynamische Performance* bzw. das synonymverwendete *dynamische Verhalten* als Oberbegriff für die Beschreibung der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und der aus ihr extrahierten Kennwerte verwendet, siehe Abschnitt 3.2.2.2. Die dynamische Mobilität beruht zwar auf dem dynamischen Verhalten, wird aber zum Vergleich mit der statischen Mobilität separat beschrieben. Der Begriff *statische Performance* oder *statisches Verhalten* bezieht sich auf die statisch ermittelte Mobilität und die Schwellspannung.

Die Analyse der Abhängigkeit von ausgewählten Prozessparametern erfolgt wie eingangs erwähnt anhand von Hypothesen. Diese werden zu Beginn jedes Abschnitts einleitend vorgestellt. Darauf folgt die parameterabhängige Analyse des dynamischen und statischen Verhaltens der Transistoren. Diese Analysen sind stets nach dem Schema:

Angabe der Schichtdicke – Beschreibung der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung – Abhängigkeit der Kennwerte vom gewählten Prozessparameter (Trends) – Gegenüberstellung der Mobilitäten – Zusammenfassung, aufgebaut. Abschließend folgt die Beurteilung der Hypothese.

5.2.1 Einfluss der Schichtdicke des Halbleiters

Die Schichtdicke des Halbleiters beeinflusst die Performance von Transistoren mit einer gestaffelten Architektur erheblich, siehe Abschnitt 2.3.2. Dies ist in dieser Architektur besonders von Interesse, da die Ladungsträger nach der Injektion zunächst den Bulk-Halbleiter entlang einer der Schichtdicke entsprechenden Strecke – abzüglich der Elektrodenhöhe – bis zur Grenzfläche passieren müssen.

Es stellt sich die Frage, wie sich die Schichtdicke neben dem in der Literatur viel dokumentierten statischen Verhalten auch auf das dynamische Verhalten des Transistors auswirkt. In einer abgewandelten Form dieser Methode zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens konnte bereits eine Verbreiterung der Verteilung mit ansteigender Halbleiterschichtdicke festgestellt werden (Ganz, 2013b). Die Auswirkungen der Schichtdicke des Halbleiters sollen anhand der folgenden Hypothese überprüft werden:

Hypothese 1:

Für flüssigprozessierte amorphe Polymerhalbleiter hängen die statische und die dynamische Mobilität von aus ihnen hergestellten bottom-contact top-gate Transistoren einzig und allein von der Schichtdicke des Halbleiters ab. Dieser Zusammenhang gilt auch für die Verteilung der Ladungsträgergeschwindigkeiten.

Zur Überprüfung dieser Hypothese ist es notwendig Einflüsse des Dielektrikums auszuschließen. Dieses wurde nach dem in Abschnitt 4.5 vorgestellten Referenzprozess Spin-Coating für alle verglichenen Proben identisch aufgebracht, um eine ausreichende Vergleichbarkeit zu garantieren. Des Weiteren ist anzumerken, dass die statisch ermittelten Kennwerte Mobilität und Schwellspannung stets aus dem Mittelwert der in den dynamischen Messungen verwendeten vier Transistoren gebildet werden, siehe auch Anhang A.1.

5.2.1.1 Schichtdickenvariation durch Spin-Coating für den Halbleiter SP400

Ein reproduzierbarer Prozess zur Erzeugung unterschiedlicher Schichtdicken ist das Spin-Coating. Durch Anpassen der Rotationsgeschwindigkeit lassen sich unter Verwendung des stets identischen Fluids Schichten unterschiedlicher Dicken erzeugen. Im Folgenden werden im Spin-Coating nach Abschnitt 4.5 hergestellte Transistoren unterschiedlicher Halbleiterschichtdicken analysiert.

Schichtdicke

Die Schichtdicken dieser Versuchsreihe sind in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit in Abbildung 5.18 gegeben. Hier dargestellt sind die statische Mobilität (a) und die zugehörige Schwellspannung (b) in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit (Spin-Coating) und somit der Schichtdicke am Beispiel des Halbleiters SP400. Bei Betrachtung der Mobilität fällt auf, dass bis zu einer Rotationsgeschwindigkeit von 1000 rpm sowohl für die Schichtdicke als auch die Mobilität erhebliche Änderungen in der Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit zu verzeichnen sind. Für höhere Rotationsgeschwindigkeiten pendeln sich beide Größen um einen Wert ein. Es besteht somit ein direkter Zusammenhang zwischen der statischen Mobilität und der Schichtdicke des Halbleiters. Im Fall des Halbleiters SP400 nimmt die statische Mobilität mit zunehmender Schichtdicke zu.

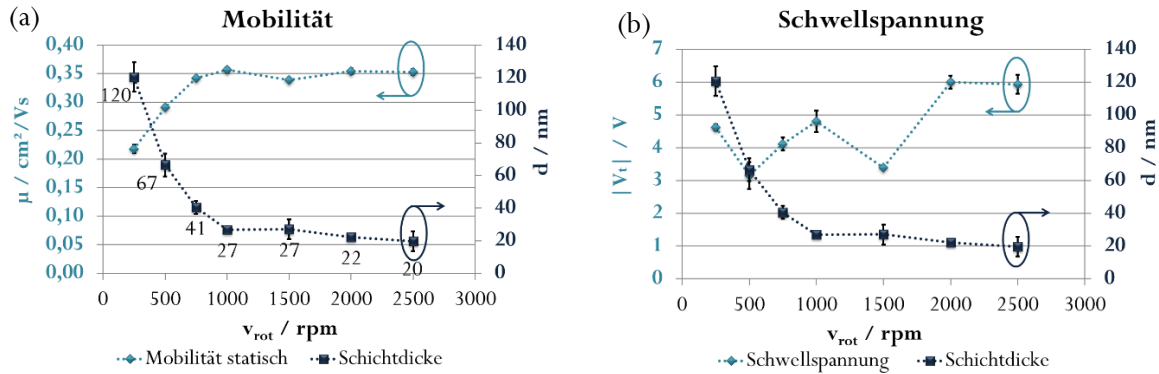


Abbildung 5.18: Gemittelte statische Mobilität μ (a) und Schwellspannung (b) in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit v_{rot} des Halbleiters SP400. Die Fehler ergeben sich aus den Standardabweichungen der jeweiligen Messwerte. Es liegen die Daten der Proben 0465-0471²³ vor, siehe auch Anhang A.1.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

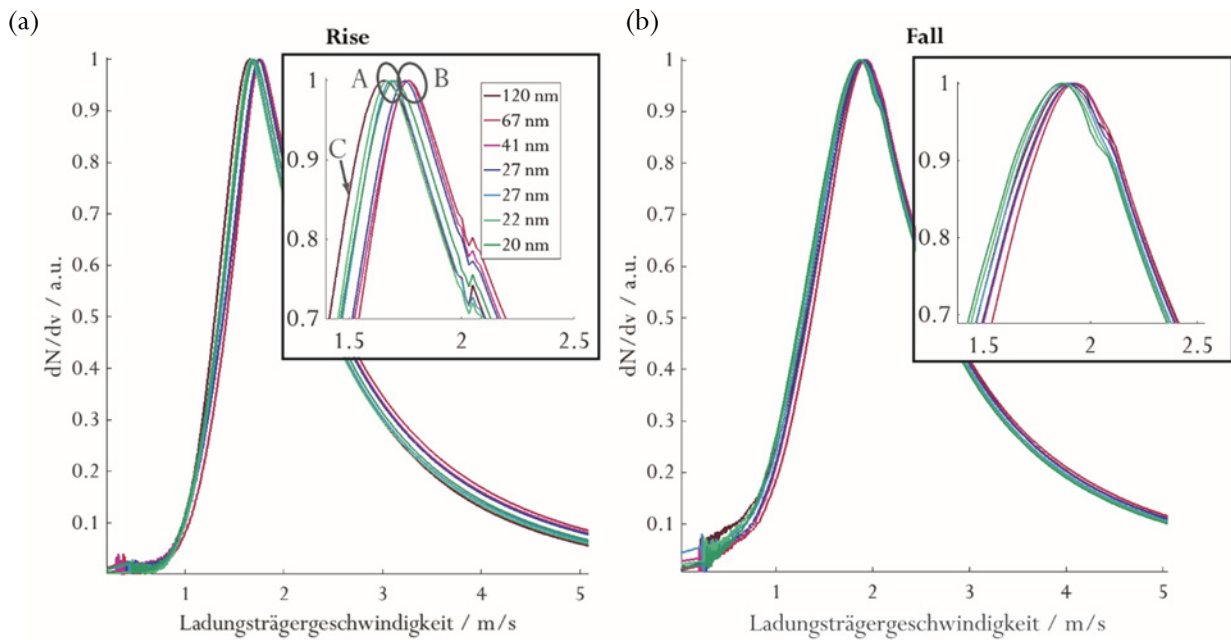


Abbildung 5.19: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung für die ansteigende Flanke Rise (a) und die abfallende Flanke Fall (b) in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit für den Halbleiter SP400²³. Alle Messungen erfolgten nach der Messvorschrift und Auswertemethode gegeben in Abschnitt 3.2.2.

²³ Proben Halbleiter SP400 Spin-Coating: 0465 – 250 rpm, 0466 – 500 rpm, 0467 – 750 rpm, 0468 – 1000 rpm, 0469 – 1500 rpm, 0470 – 2000 rpm, 0471 – 2500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Abbildung 5.19 zeigt die *normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung* in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit von im Spin-Coating hergestellten Proben des Halbleiters SP400. Es ist ersichtlich, dass für *Rise* die Verteilungen mit einer Schichtdicke von 67 nm (zugehörige Rotationsgeschwindigkeit: 500 rpm), 41 (750 rpm) und 27 nm (1000 rpm) ähnlich verlaufen - diese werden fortan in der Gruppe B zusammengefasst – sowie für 27 nm (1500 rpm), 22 nm (2000 rpm) und 20 nm (2500 rpm) – fortan in Gruppe A zusammengefasst. Die Verteilung für 120 nm (250 rpm, C) weicht vollkommen ab. Für die abfallenden Flanke ist für zunehmenden Rotationsgeschwindigkeiten, bis auf die Probe mit 120 nm, eine kontinuierliche Verschiebung der Verteilung hin zu niedrigeren Geschwindigkeiten zu beobachten. Die Beobachtungen der Verteilungen an sich spiegeln sich auch in den extrahierten *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$ wider. In Abbildung 5.20 (a) sind die Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ in Abhängigkeit der Schichtdicke dargestellt. Für beide Flanken ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Proben mit 27, 41 und 67 nm Schichtdicke zu verzeichnen. Dies spricht der in den Verteilungen identifizierten Gruppe (B). Alle weiteren Proben weichen signifikant zur hier gewählten Referenz 27 nm (1000 rpm) ab. Es ist anzumerken, dass die Schichtdicke 27 nm in dieser Versuchsreihe zwei Rotationsgeschwindigkeiten (1000 und 1500 rpm) zugeordnet werden kann. Die Standardabweichung der 1500 rpm Probe ist um Faktor drei höher als die der 1000 rpm Probe. Die Schichtdicke konnte in diesem Fall nicht zuverlässig ermittelt werden und liegt vermutlich niedriger. Das Spektrum an auftretenden Geschwindigkeiten, ermittelt anhand der *Halbwertsbreite* B_{50} , ändert sich nur stellenweise signifikant. Eine direkte Abhängigkeit von der Schichtdicke oder Rotationsgeschwindigkeit ist auch für das *Tailing*, die *Anzahl der Ladungsträger* N_{IT} sowie die *Geschwindigkeit bei Start der Verteilung* nicht zu erkennen, siehe Tabelle A.9.

Transitzeit

Die *Transitzeit* t_{tr} , siehe Abbildung 5.20 (b), verhält sich analog zu den Beobachtungen der Verteilungen im Plot und den Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum: Gruppe A weicht signifikant von der Referenz 27 nm und somit Gruppe B ab²⁴. Der Wert mit 120 nm weicht vollkommen ab. Auffällig ist, dass für eine Schichtdicke von 67 nm die höchsten Geschwindigkeiten sowie die niedrigste Transitzeit beobachtet werden. Das dynamische Verhalten zeigt für niedrigere Rotationsgeschwindigkeiten und somit höhere Schichtdicken die besseren Werte. Der *Gütefaktor* α scheint sich mit abnehmender Schichtdicke um 0,8 einzupendeln.

²⁴ Bei Fall liegt der Wert der 1500 rpm grenzwertig auf der Maximumtoleranz.

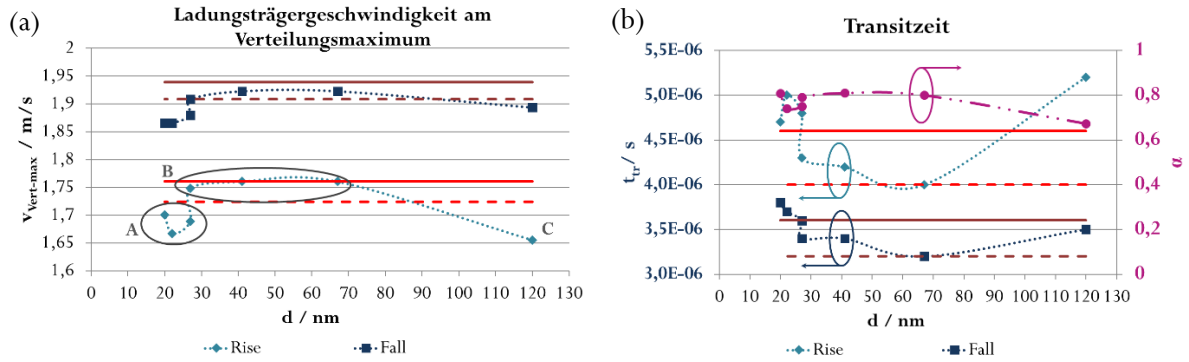


Abbildung 5.20: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a) sowie Transitzeit t_{tr} und Gütefaktor α (b) in Abhängigkeit der Schichtdicke d für Rise und Fall des Halbleiters SP400²³. Ebenfalls angegeben sind die Minimum- (rot gestrichelt) und Maximumtoleranzen (rot durchgezogen) bezogen auf die Probe mit 27 nm (1000 rpm). Werte außerhalb dieser Grenzen weichen signifikant von der Probe 1000 rpm ab.

Mobilität

Transferiert man die Transitzeit t_{tr} sowie die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ mit Hilfe von Gleichung 4.5 und den in Abbildung 5.18 gegebenen Schwellspannungen in eine *dynamische Mobilität* so ergibt sich die in Abbildung 5.21 dargestellte Tendenz. Alle drei ermittelten Mobilitäten nehmen mit abnehmender Schichtdicke zu und finden ihr Maximum bei 20 nm im Falle der dynamischen Mobilität und bei 27 nm im Falle der statischen Mobilität. Die Ausnahme bildet in allen drei Fällen die Probe 1500 rpm (27 nm). Die statische Mobilität steigt über eine Schichtdickendifferenz von 100 nm (höchster zu niedrigster) um 62 %, die Mobilität aus Transitzeit um 46 % und die Mobilität der häufigsten Ladungsträger um 35 % an. Die in den Verteilungen und Kennwerten definierte Gruppe A findet sich am Maximum wieder. Interessanterweise drehen sich durch Einbeziehen der statisch ermittelten Schwellspannung die Tendenzen in der Performance. Diese geht in Form von $\left(|V_g| - |V_t|\right)^{-1}$ in die Berechnung der Mobilität ein. Die Probe um 67 nm bildet kein Optimum mehr und die vormals schlechter abschneidende Gruppe A weist nun die maximalen Mobilitäten auf. Die dynamischen Mobilitäten sind bei der Ermittlung aus Transitzeit t_{tr} um Faktor drei höher als bei der Ermittlung aus der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$. Dies ist die logische Konsequenz aus der Tatsache, dass es sich bei ersterer um die Geschwindigkeit der schnellsten Ladungsträger und bei letzterer um die Geschwindigkeit der häufigsten Ladungsträger handelt. Des Weiteren sind die Unterschiede der für die verschiedenen Schichtdicken erreichten Mobilitätswerte größer für die Mobilitäten aus Transitzeit t_{tr} als für die Mobilitäten ermittelt aus $v_{\text{Vert-max}}$.

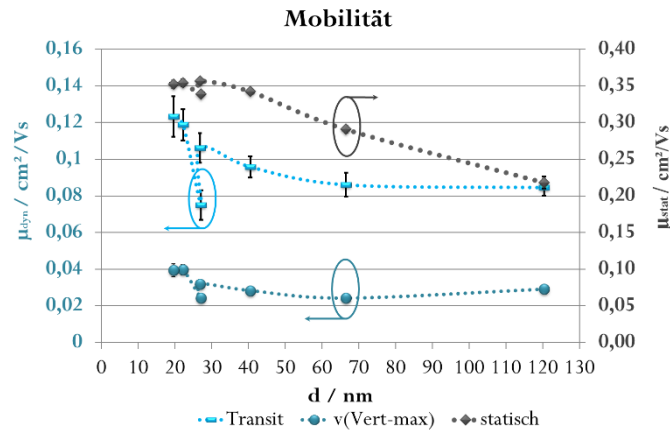


Abbildung 5.21: Dynamische Mobilität μ_{dyn} berechnet aus der Transitzeit (Transit) und aus der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum ($v(\text{Vert-max})$) sowie die statische Mobilität μ_{stat} in Abhängigkeit der Schichtdicke d für Transistoren des Halbleiters SP400²³. Die Fehlerbalken der statischen Mobilität ergeben sich aus der Standardabweichung des Mittelwerts über vier Transistoren. Die Fehlerbalken der dynamischen Mobilität ergeben sich aus der Größtfehlerabschätzung nach Gleichung 3.26. Sie sind für die Mobilität aus der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum sowie für die statische Mobilität aufgrund der Datenpunktgröße in dieser Darstellung nicht erkennbar.

Die statische Mobilität ist im Durchschnitt um Faktor drei größer als die Mobilität aus der Transitzeit und um Faktor 11 Größer als die Mobilität am Verteilungsmaximum. Der Unterschied von Faktor 10 zwischen statischer und dynamischer Mobilität kann zwei Ursachen haben: Erstens weichen das statische und das dynamische Verhalten schlicht und ergreifend voneinander ab. Diese Abweichung wurde in der Literatur aber bisher für um Faktor drei höhere dynamische Mobilitäten dokumentiert, siehe Abschnitt 3.1.5.1. Zweitens kann der Unterschied auf die hohe Gate-Spannung (40 V) bei der Extraktion der statischen Mobilität und der damit verbundenen Gate-Spannungs-Abhängigkeit der Mobilität zurückzuführen sein. An dieser Stelle ist anzumerken, dass es beim Vergleich mit der statischen Mobilität nicht um einen Vergleich der Absolutwerte geht, sondern darum, welche Tendenzen sich in Abhängigkeit des untersuchten Parameters, hier der Schichtdicke, finden lassen.

Zusammenfassung

Die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung hängt also von der Schichtdicke des Halbleiters SP400 ab. Die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ und die Transitzeit t_{tr} weisen beide ein Optimum bei einer Schichtdicke von 67 nm auf. Diese extrahierten Kennwerte sowie die Verteilungen an sich lassen sich in drei Gruppen gliedern, die ein ähnliches Verhalten aufweisen (A: 27-20 nm; B: 67-27 nm; C: 120 nm). Hierbei ist die Gruppe B in der Performance besser als Gruppe A und C (in

absteigender Reihenfolge). Eine Ausnahme bildet stets Probe 1500 rpm mit 27 nm der Gruppe A. Alle übrigen Kennwerte lassen keine direkte Abhängigkeit zur Schichtdicke erkennen. Die statische und die dynamischen Mobilitäten weichen vom zuvor beobachteten Verhalten ab: sie steigen mit abnehmender Schichtdicke an und finden ihr Maximum bei Gruppe A. Dieses Optimum bei 10-30 nm wurde bereits von *Grau und Subramanian* (2016) dokumentiert.

Für die Abhängigkeit der Schichtdicke muss somit zwischen der Kennwertbeurteilung und der Beurteilung der Mobilitäten unterschieden werden. Für die Kennwerte ergibt sich ein Optimumsplateau zwischen 27 und 67 nm Schichtdicke (fortan *Bereich KW* genannt), für die Mobilität ein Optimum zwischen 20 und 27 nm Schichtdicke (fortan *Bereich MO* genannt). Innerhalb der jeweiligen Bereiche können die Proben als von der Schichtdicke unabhängig bewertet werden. Eine Unabhängigkeit der Kennwerte von Gruppe A besteht mit 2500 rpm (20 nm) als Referenz bei *Fall* vollständig, bei *Rise* nicht, siehe Abbildung A.5.

5.2.1.2 Schichtdickenvariation durch Spin-Coating für den Halbleiter PIF8-TAA

Für den Halbleiter PIF8-TAA wurde ebenfalls eine Versuchsreihe im Spin-Coating erstellt, in welcher durch Änderung der Rotationsgeschwindigkeit die Halbleiterschichtdicke angepasst wurde.

Schichtdicke

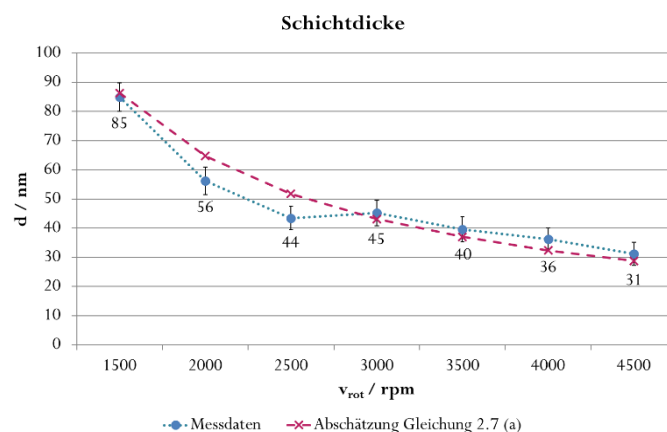


Abbildung 5.22: Gemessene Schichtdicke d (Dektak, siehe Abschnitt 4.7) in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit v_{rot} für den Halbleiter PIF8-TAA. Zur Abschätzung anhand von Gleichung 2.7 (a) wurde ein Vorfaktor von 0,1 verwendet. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung aus 10 Messpunkten einer Probe an.

Die Schichtdicke in Abbildung 5.22 fällt für den Halbleiter PFI8-TAA gemäß Gleichung 2.7 (a) für während des Spin-Coatings nicht verdunstende Fluide mit $1/v_{\text{rot}}$ ab. Im Gegensatz zum Halbleiter SP400 stellt sich hier kein Plateaubereich für bestimmte Rotationsgeschwindigkeiten ein. Obwohl die Änderung der Rotationsgeschwindigkeit in einem größeren Bereich erfolgt, liegt der Unterschied zwischen der größten und der geringsten Schichtdicke nur bei 54 nm im Vergleich zu den 100 nm beim Halbleiter SP400. Doch wie wirken sich diese Schichtdickenunterschiede auf die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung bei einem bereits akkumulierten Kanal aus?

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

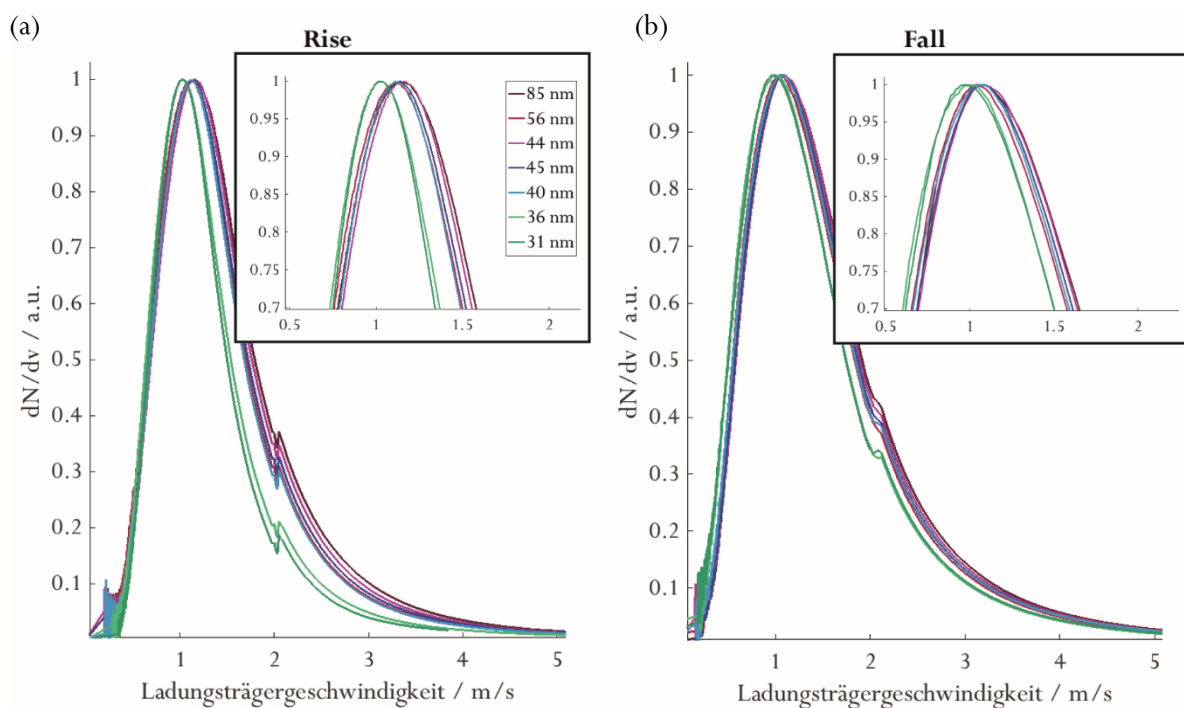


Abbildung 5.23: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung für die ansteigende Flanke *Rise* (a) und die abfallende Flanke *Fall* (b) in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit für den Halbleiter PFI8-TAA. Es liegen die Daten der Proben 0444-0450²⁵ vor.

Abbildung 5.23 zeigt die normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung für im Spin-Coating erzeugte Proben des Halbleiters PFI8-TAA als Funktion der Schichtdicke. Sowohl für die ansteigende Flanke *Rise* (a) als auch für die abfallende Flanke *Fall* (b) weichen die Verteilungen der Proben mit 36 und

²⁵ Proben Halbleiter PFI8-TAA Spin-Coating: 0444 – 1500 rpm, 0445 – 2000 rpm, 0446 – 2500 rpm, 0447 – 3000 rpm, 0448 – 3500 rpm, 0449 – 4000 rpm, 0450 – 4500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

31 nm signifikant von den übrigen Verteilungen ab, siehe auch Abbildung A.6. Sie sind zu niedrigeren Ladungsträgergeschwindigkeiten hin verschoben.

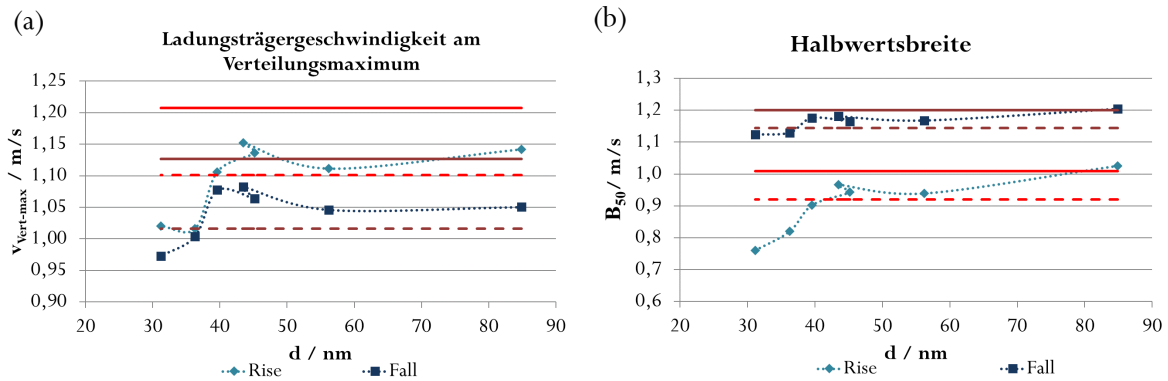


Abbildung 5.24: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a) sowie die Halbwertsbreite B_{50} (b) in Abhängigkeit der Schichtdicke d für den Halbleiter PIF8-TAA²⁵. Es sind vergleichend sowohl die Werte für *Rise* und *Fall* dargestellt. Die roten Balken stellen die Minimum- (gestrichelt) und Maximumtoleranzen (durchgezogen) bezogen auf die Werte der Probe 44 nm (2500 rpm) und berechnet nach Abschnitt 3.2.2.2 für *Rise* in hellrot und *Fall* in dunkelrot dar.

Auch in den *Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$, dargestellt in Abbildung 5.24 (a), zeigt sich die für die Verteilung beobachtete signifikante Abweichung der beiden Proben von der Referenz 43 nm. Generell verschieben sich die Verteilungen mit abnehmender Schichtdicke zu niedrigeren Ladungsträgergeschwindigkeiten hin und die *Breite der Verteilung* B_{50} nimmt ab, siehe Abbildung 5.24 (b). Für die weiteren extrahierten Parameter *Geschwindigkeit am Verteilungsanfang* $v_{\text{Vert-Start}}$ und die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} konnte kein eindeutiger Zusammenhang mit der Rotationsgeschwindigkeit festgestellt werden, siehe auch Tabelle A.10.

Transitzeit

Abbildung 5.25 zeigt die *Transitzeit* t_{tr} für die ansteigende und abfallende Flanke sowie den *Gütefaktor* α in Abhängigkeit der Schichtdicke. Es ist ersichtlich, dass für *Rise* alle Werte signifikant von der Referenz 44 nm abweichen. Für *Fall* hingegen weicht nur die Probe mit 36 nm ab. Die niedrigste Transitzeit liegt in beiden Fällen bei 44 nm vor. Für höhere und niedrigere Schichtdicken steigt die Transitzeit an. Sie ist am höchsten für die 31 nm Probe an der ansteigenden Flanke. Der *Gütefaktor* α pendelt sich für Schichtdicken ≥ 40 nm bei Werten um die $0,93 \pm 0,03$ ein. Für Schichtdicken darunter (Proben mit 36 nm und 31 nm) fällt er ab.

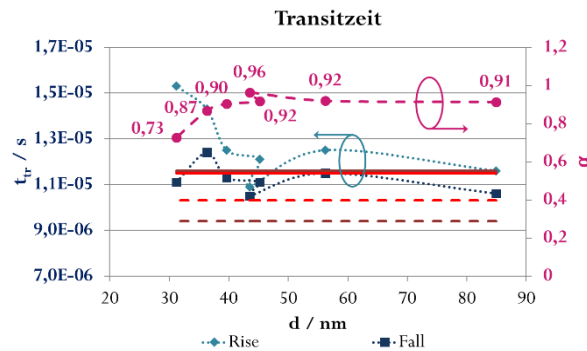


Abbildung 5.25: Transitzeiten t_{tr} für *Rise* und *Fall* sowie der Gütefaktor α in Abhängigkeit der Schichtdicke d für den Halbleiter PIF8-TAA²⁵. Die hellroten Toleranzgrenzen sind angelegt für *Rise*, die dunkelroten für *Fall*. In beiden Fällen dient die Probe mit 44 nm als Referenz.

Die beiden abweichenden Proben weisen die niedrigsten Schichtdicken auf (36 ± 4 nm und 31 ± 4 nm). Auffällig ist, dass bei einer Höhe der Source-Drain-Elektroden von 50 nm, diese beiden Werte als einzige deutlich darunter liegen. Ein Zusammenhang zwischen der Halbleiterschichtdicke und der Elektrodenhöhe bzw. der damit verbundenen Bedeckung der Elektroden mit dem Halbleiter wurde bereits von *Pankalla* für den Halbleiter PIF8-TAA dokumentiert, siehe Abschnitt 2.3.2.

Mobilität

Für den Halbleiter PIF8-TAA wurde ebenfalls die *dynamische Mobilität* bestimmt. Allerdings kam hier, im Gegensatz zum Halbleiter SP400, Gleichung 3.6 zum Einsatz, da die Messungen unter vorgespanntem Gate stattgefunden hatten. Die dynamische Mobilität ermittelt aus der Transitzeit t_{tr} und ermittelt aus der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{vert-max}$ sowie die statisch ermittelte Mobilität sind in Abhängigkeit der Schichtdicke in Abbildung 5.26 dargestellt. Die dynamischen Mobilitäten sind für die Ermittlung aus Transitzeit in etwa doppelt so hoch wie für die Ermittlung aus dem Verteilungsmaximum. Dies bedeutet, dass die schnellsten Ladungsträger eine in etwa doppelt so hohe Mobilität aufweisen als die Ladungsträger mit der häufigsten Geschwindigkeit. In beiden Fällen ist die Mobilität für Schichtdicken unter 40 nm am geringsten. Für Schichtdicken höher als 40 nm ist die Mobilität aus dem Verteilungsmaximum annähernd konstant. Sie schwankt zwischen dem minimalen und dem maximalen Wert um 4 %. Die aus statischen Messungen ermittelte Mobilität ist für den höchsten Wert um gerade 8 % höher als für den niedrigsten. Allerdings ist anzumerken, dass in diesem Fall die Mobilität mit sinkender Schichtdicke zunimmt. Für die Mobilität berechnet aus der Transitzeit liegt dieser Unterschied bei 7 % und zeigt sich ausgeprägter aufgrund der höheren Mobilität an sich. Die beiden höchsten Werte aus der Transitzeit sind bei 43,5 nm ($0,0573 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) und bei

86,5 ($0,0539 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) zu erkennen. Die leichte Erhöhung bei diesen beiden Werten ist auch in den aus dem Verteilungsmaximum extrahierten Mobilitäten zu erkennen. Als Fehler wurde der Größtfehler nach Gleichung 3.27 berechnet. Die der statischen Mobilität ergeben sich aus der Standardabweichung des Mittelwerts und bewegen sich zwischen $0,0002$ und $0,0007 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

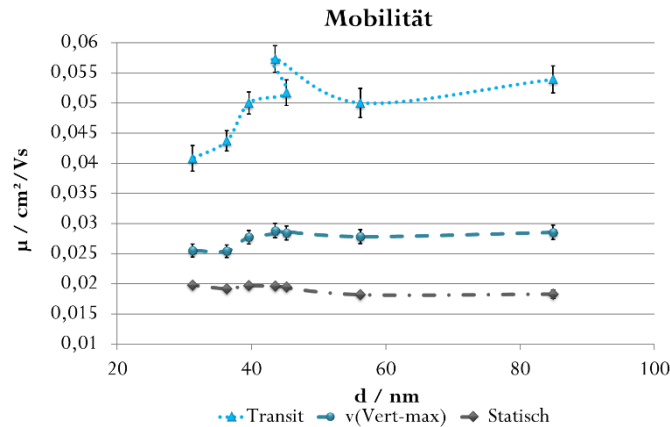


Abbildung 5.26: Dynamische und statische Mobilität μ des Halbleiters PIF8-TAA²⁵ ermittelt aus der Transitzeit (Transit) und der Ladungsträgersgeschwindigkeit am Verteilungsmaximum ($v(\text{Vert-max})$) nach Gleichung 3.6 bzw. nach ESR.

Zusammenfassung

Zusammenfassend ergibt sich für die Schichtdickenabhängigkeit des Halbleiters PIF8-TAA: Mit zunehmender Schichtdicke wird die Verteilung breiter und die Ladungsträgersgeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ steigt. Bei Schichtdicken kleiner 40 nm weichen die Werte signifikant von den restlichen Werten ab. Oberhalb 40 nm sind die Unterschiede am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ bzw. in der Breite B_{50} zwar zu erkennen aber nicht signifikant. Es existiert somit ein Plateau zwischen 40 und 85 nm. Diese kritische Grenze von 40 nm zeigt sich auch in der dynamischen Mobilität und ist in der statischen angedeutet. Bei Extraktion aus dem Verteilungsmaximum läuft sie für Schichten höher 40 nm in Sättigung. Die Mobilität aus Transitzeit zeigt jedoch weitere Abweichungen. In allen Fällen zeigt die Probe 2500 rpm mit 44 nm die höchste Mobilität.

5.2.1.3 Schichtdickenvariation durch Erhöhung des Feststoffgehaltes für den Halbleiter PIF8-TAA

Eine weitere Möglichkeit die Schichtdicke einer Halbleiterschicht zu variieren ist die Variation des Feststoffgehalts. Diese Versuchsreihe wird anhand von Halbleiter PIF8-TAA durchgeführt, da dieser als

Feststoff vorlag und die Fluide angesetzt werden konnten. Aus der bezugsfertigen Lösung des Halbleiters SP400 entstanden im Spin-Coating, siehe Abschnitt 5.2.1.1, so dünne Schichten, dass eine Variation des Feststoffgehalts durch Verdünnen nicht als sinnvoll erachtet wurde. Gleichzeitig soll der Einfluss des Feststoffgehalts unter verschiedenen Beschichtungsbedingungen untersucht werden. Hierfür werden das Spin-Coating und der Tiefdruck gewählt. Da beide Versuchsreihen nicht an einem Tag durchgeführt werden konnten, erfolgt zusätzlich zu den üblichen Signifikanzanalysen eine Prüfung auf Abweichungen, die auf die unterschiedlichen Herstellungstage zurückzuführen sind (*Tagesvergleich*), siehe Abschnitt 5.1.5.1. Entsprechende Abweichungen werden benannt.

Schichtdicke

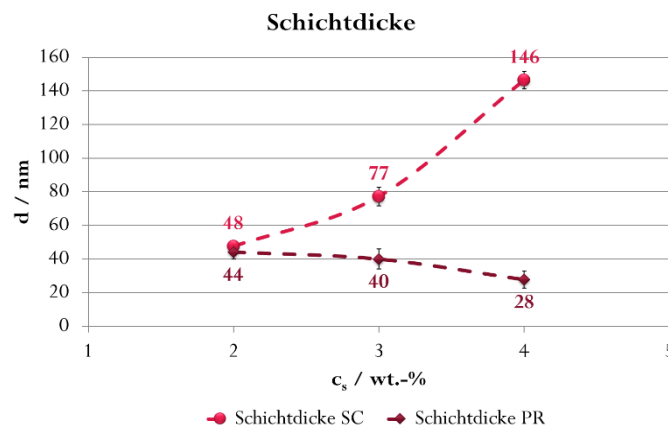


Abbildung 5.27: Schichtdicke d (Dektak, siehe Abschnitt 4.7) in Abhängigkeit des Feststoffgehalts c_s von PIF8-TAA-Lösungen für im Spin-Coating (Proben: 0424-0426²⁶) und im Tiefdruck (Proben: 0385-0390²⁶) erzeugte Proben.

Mit einer Erhöhung des Polymeranteils im zu prozessierenden Fluid geht jedoch auch eine Erhöhung der Viskosität, siehe Abschnitt 4.2.2, und eine mögliche Beeinflussung des Fällungsmechanismus einher. Welche Auswirkungen dies haben kann, sei anhand der Schichtdickenbestimmung von Proben unterschiedlichen Feststoffgehalts in Abbildung 5.27 gezeigt. Diese zeigt die konzentrationsabhängige Schichtdicke des Halbleiters PIF8-TAA für Proben aus dem Spin-Coating (SC) und Proben aus dem Tiefdruck (TD). Für erstere steigt die Schichtdicke mit zunehmendem Feststoffgehalt an. Dies ist zum

²⁶ Proben Halbleiter PIF8-TAA Spin-Coating: 0424 – 2 wt.-%, 0425 – 3 wt.-%, 0425 – 4 wt.-% alle bei 4000 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.

Proben Halbleiter PIF8-TAA Tiefdruck GT+W Superproofer: 0385+0386 – 2 wt.-%, 0387+0388 – 3 wt.-%, 0389+0390 – 4 wt.-% Druckform pHL80-VF-80, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

einen darauf zurückzuführen, dass die Nassfilmdicke nach Gleichung 2.7 (a) mit $\sqrt{\eta}$ steigt, und zum anderen zusätzlich dazu die resultierende Trockenschichtdicke mit dem Feststoffgehalt steigt. Die zugehörigen Viskositäten sind in Abschnitt 4.2.2 gegeben. Für die im Tiefdruck erzeugten Proben nimmt die Schichtdicke mit zunehmendem Feststoffgehalt ab. Dies wurde nicht erwartet. Solch ein Verhalten kann im Druck mehrere Ursachen haben: Einerseits kann es aufgrund der ansteigenden Viskosität zu Fehlern bei der Fluidübertragung kommen, z.B. können Näpfchen unvollständig entleert worden sein. Andererseits kann schlicht und ergreifend eine fehlerhafte Bestimmung der Schichtdicke vorliegen. Durch die hohen Viskositäten wird der Leveling-Prozess gestört, was in Inhomogenitäten in der Schicht resultiert. Durch das möglicherweise ungleichmäßige Mitteln der Schichtdicken über diese Inhomogenitäten entstehen die abnehmenden Werte. Die Schichtdicke kann mit den üblicherweise verwendeten Verfahren nicht korrekt bestimmt werden. In Abbildung 5.28 sind Mikroskopaufnahmen dieser Schichten gezeigt. Die wolkige Struktur wird mit zunehmendem Feststoffgehalt intensiver. Die Ausbildung von Inhomogenität wird zum einen durch die mit Faktor zwei bzw. fünf ansteigende Viskosität begünstigt und zum anderen durch das Verwenden einer Druckform mit 80 % Flächendeckung. Durch letztere erfolgt ein Absetzen der einzelnen Tropfen aus den Näpfchen mit einem hohen definierten Abstand zueinander. Die vorgegebene Struktur besitzt also bereits eine hohe Wellenlänge, siehe Abschnitt 2.2.1 und Abbildung 5.41. Zwischen den Näpfchen wird ein sehr dünner Film übertragen über welchen eine Fluidbrücke zwischen den Tropfen bestehen kann. Dennoch hindert die hohe Viskosität den Nassfilm daran vollständig zu leveln.

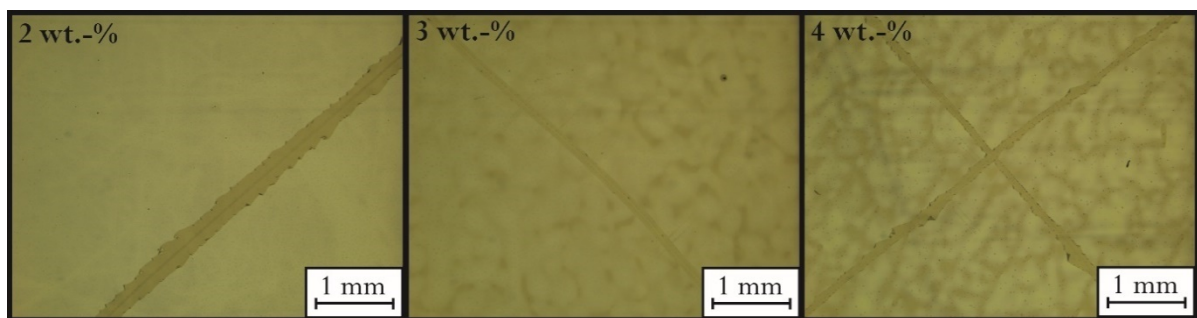


Abbildung 5.28: Mikroskopaufnahmen (LEICA DM4000M, 2,5-fache Vergrößerung) der im Tiefdruck (TD) erzeugten Schichten des Halbleiters PIF8-TAA aus Lösungen verschiedenen Feststoffgehalts (2, 3 und 4 wt.-%).

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Es wäre naheliegend zu vermuten, dass die inhomogensten Schichten die Transistoren mit der schlechtesten Performance liefern. Abbildung 5.29 zeigt die normierten

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen für je eine im Spin-Coating (SC) und je eine im Tiefdruck (TD) hergestellte Probe als Funktion des Feststoffgehalts 2 wt.-% (a), 3 wt.-% (b) und 4 wt.-% (c). Für den niedrigsten Feststoffgehalt weichen die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen deutlich voneinander ab. Der vorhandene Abstand am Verteilungsmaximum sowie der Verteilung an sich verringert sich mit zunehmendem Feststoffgehalt.

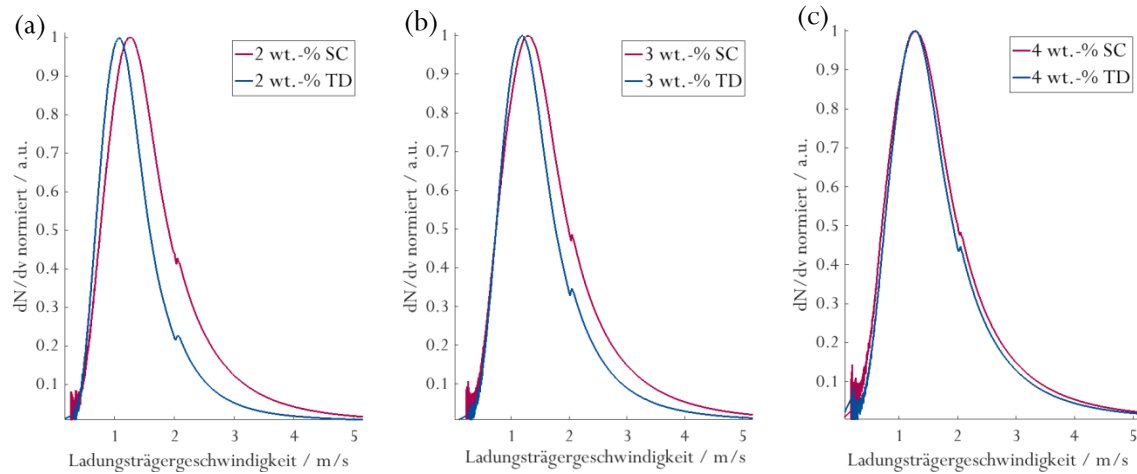


Abbildung 5.29: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen als Funktion des Feststoffgehalts c_s 2 wt.-% (a), 3 wt.-% (b) und 4 wt.-% (c) im Vergleich für im Spin-Coating und im Tiefdruck erzeugte Proben²⁶ der ansteigenden Flanke *Rise*.

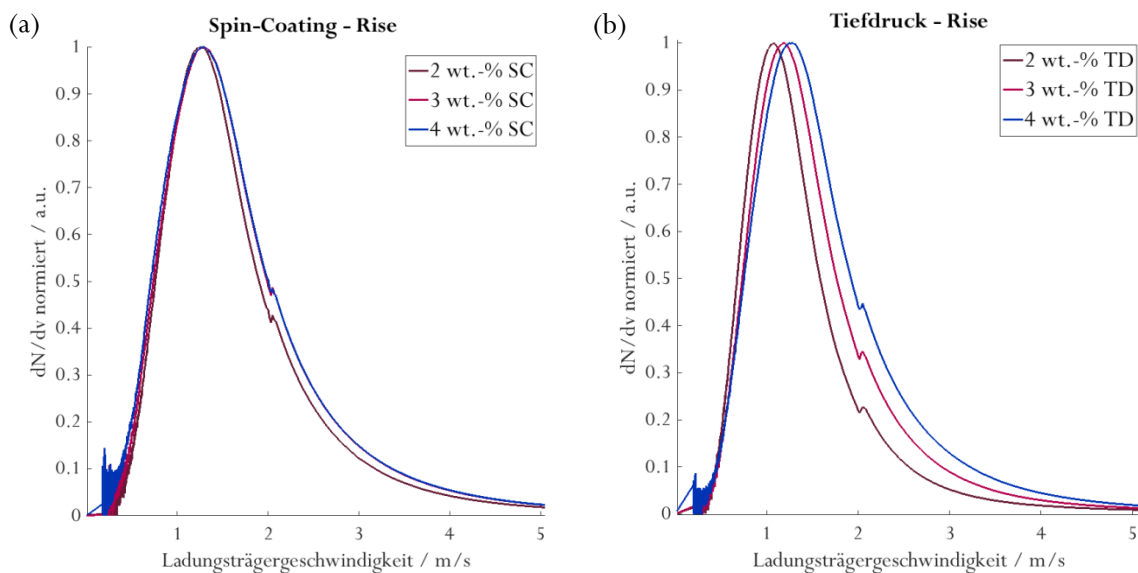


Abbildung 5.30: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen als Funktion des Feststoffgehalts c_s im Vergleich für im Spin-Coating (SC) (a) und im Tiefdruck (TD) (b) erzeugten Proben²⁶.

Bei Vergleich der Verteilungen und Kennwerte innerhalb einer Versuchsreihe, d.h. nur für im Spin-Coating oder nur für im Tiefdruck hergestellte Proben, fällt auf, dass diese Verschiebung von den

gedruckten Proben herrührt. Die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung für im Spin-Coating hergestellte Proben ändert sich kaum merklich, siehe Abbildung 5.30 (a), bzw. ändert sich die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{Vert-max}$ nicht signifikant, siehe Abbildung 5.31 (a). Im Gegensatz dazu verschiebt sich die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung für im Tiefdruck hergestellte Proben mit zunehmendem Feststoffgehalt zu höheren Geschwindigkeiten hin, siehe Abbildung 5.30 (b).

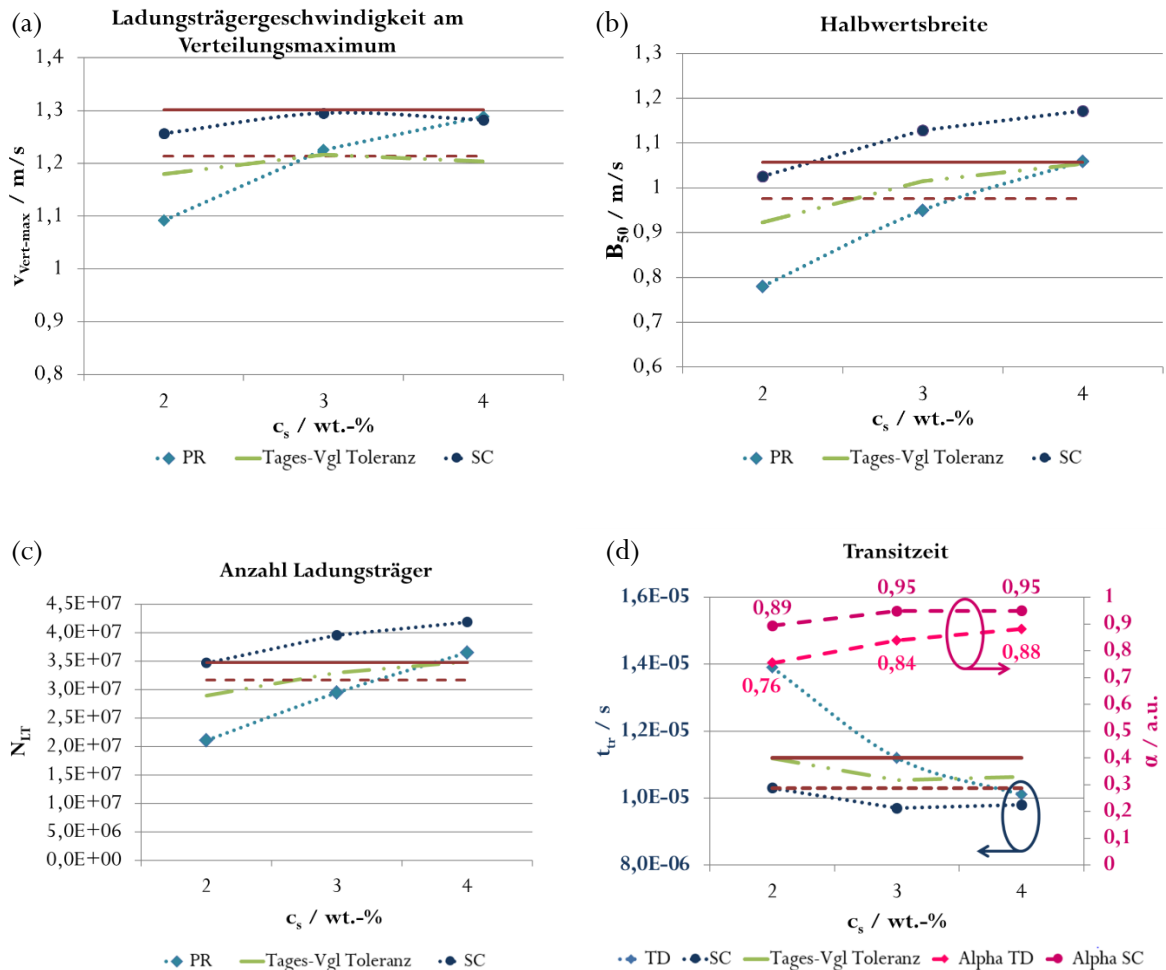


Abbildung 5.31: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Anzahl der gemessenen Ladungsträger N_{LT} (c) sowie Transitzeit t_{tr} und Gütefaktor α (d) in Abhängigkeit des Feststoffanteils c_s für im Spin-Coating (SC) und im Tiefdruck (TD) hergestellte Proben²⁶. Für erstere weichen die Maxima in (a) nicht signifikant voneinander ab. Die grüne Linie gibt die Toleranzgrenze des Tagesvergleichs an (Tages-Vgl Toleranz), in rot die Toleranzgrenzen für die signifikante Abweichung von der Probe SC 2 wt.-%.

Die *Halbwertsbreite* B_{50} nimmt für beide Herstellungsarten mit zunehmendem Feststoffanteil signifikant zu, siehe Abbildung 5.31 (b). Allgemein sind die Verteilungen der SC-Proben stets breiter als die der TD-Proben, d. h. das Spektrum an auftretenden Ladungsträgerschwindigkeiten ist für im Spin-Coating erzeugte Proben größer. Dies ist auf die höheren Schichtdicken der Spin-Coating Proben zurückzuführen. Auch die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} , siehe (c), nimmt in beiden Fällen signifikant mit ansteigendem Feststoffanteil zu, wobei stets mehr Ladungsträger aus SC-Proben erfasst werden als aus gedruckten. Es ist anzumerken, dass die Probe mit 4 wt.-% für die Halbwertsbreite B_{50} auf und für die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} innerhalb der Tagesvergleichstoleranz liegt.

Transitzeit

Die *Transitzeit* t_{tr} nimmt für beide Herstellungsarten signifikant mit ansteigendem Feststoffanteil ab, siehe Abbildung 5.31 (d). Für die im Tiefdruck erzeugten Proben ist ein Unterschied von 4 μ s zu verzeichnen. Bei Verwendung des Fluids mit 4 wt.-% sind die Transitzeiten für beide Verfahren nahezu identisch bei $\sim 10 \mu$ s. Der *Gütefaktor* α steigt in beiden Fällen mit dem Feststoffanteil an, siehe Abbildung 5.31 (d). Nach *Dost*, siehe Abschnitt 3.1.4.3, entspricht ein α von eins der perfekten, fallfreien Grenzfläche. Diese Beobachtung der zunehmenden Güte geht für die gedruckten Proben nicht mit der optischen Güte der entstehenden Schichten einher. α ist höher für im Spin-Coating erzeugte Proben, überschreitet aber nicht 0,95.

Mobilität

Abbildung 5.32 (a) zeigt die *statische* und die *dynamische Mobilität*, ermittelt aus der Transitzeit t_{tr} und ermittelt aus der Ladungsträgerschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$, in Abhängigkeit des Feststoffgehalts im Vergleich für beide Verfahren. Bei den dynamischen Mobilitäten sind die der TD-Proben stets niedriger oder gleich den SC-Proben. Für die statische Mobilität wird ein entgegengesetztes Verhalten beobachtet. Hier ist die Mobilität der gedruckten Proben höher. Allgemein sind die statischen Mobilitäten die niedrigsten, gefolgt von den Mobilitäten, ermittelt aus der Ladungsträgerschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$, und den höchsten Mobilitäten, ermittelt aus der Transitzeit t_{tr} . Für die gedruckten Proben liegen die statische Mobilität und die Mobilität der Ladungsträger am Verteilungsmaximum dicht beieinander (Abweichung $< 15 \%$). Erstere zeigt eine minimale Mobilität bei 3 wt.-%, letztere steigt mit zunehmendem Feststoffanteil an. Für die im Spin-Coating erzeugten Proben ist die Abweichung der Mobilitäten mit bis zu 37 % höher als für die Proben aus dem Tiefdruck. Die Werte aus statischer Messung sinken mit zunehmendem Feststoffanteil, während

die Werte aus dynamischer Messung nur leicht um $0,0007 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ansteigen. Die Mobilitäten aus der Transitzeit steigen für beide Verfahren, für den Tiefdruck steiler als für das Spin-Coating, an und ergeben für die Probe mit 4 wt.-% einen ähnlichen Wert um $0,06 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Die zu Beginn festgestellte Inhomogenität in der Schicht der mit 4 wt.-%-iger Lösung hergestellten Probe schlägt sich somit nicht in der Mobilität ihrer Ladungsträger nieder. Es ist anzumerken, dass die dynamische Mobilität in diesen Messungen direkt zum Kehrwert der Transitzeit t_{tr} proportional ist und kein Einfluss der Schwellspannung vorliegt. Somit ist dies nur eine Wiederholung der Erkenntnis aus der Transitzeit t_{tr} und kein weiteres bestätigendes Ergebnis. Von weiterem Interesse ist die Betrachtung der Mobilitäten in Abhängigkeit der Schichtdicke, siehe Abbildung 5.32 (b). Die Mobilität am Verteilungsmaximum scheint vom Beschichtungsverfahren unabhängig über einen Bereich von 28 bis 146 nm konstant um $0,0318 \pm 0,0005 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ zu liegen. Dies ist in Abbildung 5.32 (b) durch die blassrote Linie dargestellt. Eine Ausnahme bildet die 2 wt.-%-Probe der im Tiefdruck erzeugten Transistoren. Auch für die statische Mobilität scheint es einen vom Verfahren unabhängigen Zusammenhang zu geben. Diese fällt mit zunehmender Schichtdicke um $0,008 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ab. Für die dynamische Mobilität aus Transitzeit kann kein verfahrensunabhängiger Zusammenhang zur Schichtdicke festgestellt werden.

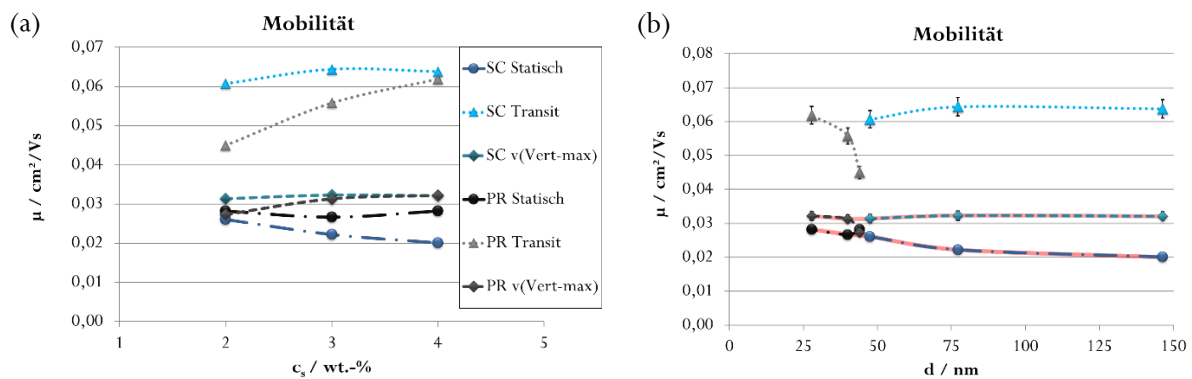


Abbildung 5.32: Statische und dynamische Mobilität μ als Funktion des Herstellungsverfahrens²⁶ in Abhängigkeit des Feststoffanteils c_s (a) und der Schichtdicke d (b). Die in (b) dargestellten Fehlerbalken der statisch ermittelten Mobilität und der Mobilität aus v(Vert-max) sind hinter den Datenpunkten nicht ersichtlich. Die blassrote Linie deutet die verfahrensunabhängige Schichtdickenabhängigkeit an.

Zusammenfassung

Zusammenfassend ist zu sagen: Mit zunehmendem Feststoffanteil bleibt die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ im Spin-Coating gleich, während sie im Tiefdruck zunimmt. Die Verteilungen aus dem Tiefdruck liegen bei kleinem Feststoffgehalt bei niedrigen Geschwindigkeiten und werden mit zunehmendem Feststoffanteil so hin zu höheren Geschwindigkeiten

verschoben, dass diese mit der im Spin-Coating erzeugten Probe überlappen. Die Halbwertsbreite B_{50} und die Anzahl der Ladungsträger N_{IT} nehmen sowohl für die im Spin-Coating als auch für die im Tiefdruck erzeugten Proben zu. Die Transitzeiten t_{tr} nehmen mit zunehmender Konzentration des Halbleiters ab. Eine Erhöhung der Viskosität (Faktor 4) durch die Erhöhung des Feststoffanteils (Faktor 2) schlägt sich somit drastischer im dynamischen Verhalten gedruckter Transistoren nieder als im Verhalten von im Spin-Coating erzeugten Proben. Die dynamisch ermittelte Mobilität aus dem Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ sowie die statisch ermittelte Mobilität scheinen verfahrensunabhängig über einen Schichtdickenbereich von 118 nm konstant zu sein bzw. leicht abzufallen. Interessanterweise weichen die Trends, die sich aus dem statischen und dem dynamischen Verhalten ergeben, voneinander ab: im dynamischen Verhalten schneiden hohe Viskositäten und hohe Feststoffanteile besser ab als niedrige. Die statische Mobilität verhält sich dem genau entgegengesetzt.

5.2.1.4 Einfluss des Beschichtungsprozesses für den Halbleiter PIF8-TAA

In den vorherigen Abschnitten 5.2.1.2 und 5.2.1.3 wurde gezeigt, dass für im Spin-Coating hergestellte Proben des Halbleiters PIF8-TAA ein Plateau für die Kennwerte des dynamischen Verhaltens in einem bestimmten Schichtdickenbereich (40 – 85 nm) besteht, sowie, dass die Mobilität in einem ähnlichen Bereich (28-146 nm) (bei Extraktion am Verteilungsmaximum bzw. für die statische Mobilität) vom Beschichtungsverfahren unabhängig ist. Im Folgenden soll der Einfluss des Beschichtungsverfahrens untersucht werden, d.h. Transistoren gleicher Schichtdicke aber unterschiedlichen Herstellungsverfahrens werden nun vergleichend betrachtet.

Schichtdicke

Hierfür wurden eine Probe aus dem Spin-Coating (Schichtdicke: 56 ± 5 nm; Probe 0445), eine Probe aus dem Tiefdruck (Schichtdicke: 50 ± 7 nm; Probe 0484) und eine Probe aus dem Flexodruck (Schichtdicke: 54 ± 4 nm; Probe 0500) gewählt.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Abbildung 5.33 zeigt die zugehörigen normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen. Es ist ersichtlich, dass die gesamte Verteilung und somit ihre *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{Vert-max}$ für die im Spin-Coating erzeugte Probe für *Rise* am weitesten zu hohen Geschwindigkeiten hin verschoben ist. In absteigender Reihenfolge folgen der Flexodruck und der Tiefdruck. Bei *Fall* ist die Verteilung für den Tiefdruck mit größerem Abstand zu niedrigeren

Geschwindigkeiten hin verschoben. Die Verteilungen für den Flexodruck und für das Spin-Coating verlaufen annähernd gleich.

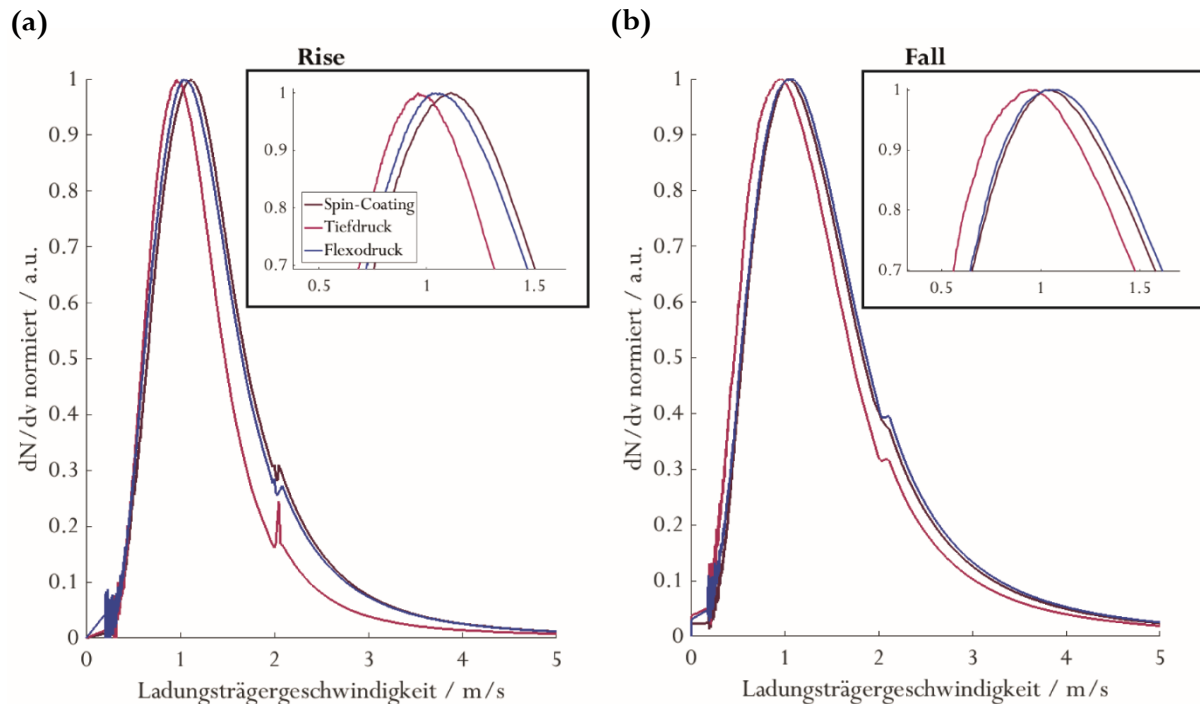


Abbildung 5.33: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung für *Rise* (a) und *Fall* (b) für Proben unterschiedlichen Herstellungsverfahrens²⁷, aber gleicher Schichtdicke des Halbleiters PIF8-TAA.

Die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$ verschiebt sich für die Tiefdruck-Probe über die Flexodruck-Probe bis hin zur Spin-Coating-Probe zu höheren Ladungsträgergeschwindigkeiten. Aufgrund der guten Erkennbarkeit der Verteilungsmaxima in den Abbildung 5.33 wird auf eine zusätzliche Darstellung der Geschwindigkeiten am Verteilungsmaximum verzichtet. In Abbildung 5.34 (a) wird dargestellt, dass die *Breite der Verteilung* B_{50} für im Tiefdruck erzeugte Proben am geringsten ist. Für Spin-Coating und Flexodruck ist die Breite höher aber untereinander nicht signifikant unterschiedlich (bezogen auf Spin-Coating als Referenz). Die im Tiefdruck erzeugte Probe weist also das geringste Spektrum an Ladungsträgergeschwindigkeiten auf. Betrachtet man in Abbildung 5.34 (b) die *Form der Verteilung* bei 50 % ihrer Höhe, d.h. bei der *Halbwertsbreite* B_{50} , so ist ersichtlich, dass für *Rise* der

²⁷ Proben Halbleiter PIF8-TAA Spin-Coating: 0445 – 2000 rpm ; Dielektrikum D320#B nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.
 Proben Halbleiter PIF8-TAA Tiefdruck GT+W Superproofer: 0484 – Druckform pHL80-VF-80, siehe Abschnitt 4.6.2;
 Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.
 Proben Halbleiter PIF8-TAA Flexodruck IGT-F1: 0500 – Rasterwalze 12 mL/m², siehe Abschnitt 4.6.1; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.
 Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Tailinganteil höher ist als für *Fall*. Das bedeutet, dass die Verbreiterung der Verteilung, die zwischen *Rise* und *Fall* beobachtet wird, hauptsächlich durch Ladungsträger höherer Geschwindigkeit erfolgt. Für die im Spin-Coating erzeugte Probe beträgt der prozentuale Anteil des Tailings nahezu 50 % für *Rise*. Die Verteilung ist somit annähernd achsensymmetrisch zur Geschwindigkeit am Verteilungsmaximum. Für den Tiefdruck findet zwischen *Rise* und *Fall* eine Verformung hin zu höheren Geschwindigkeiten statt, für den Flexodruck bleibt die *Form der Verteilung* annähernd gleich. Die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} ist für den Tiefdruck am geringsten und für das Spin-Coating am höchsten, siehe Abbildung A.8.

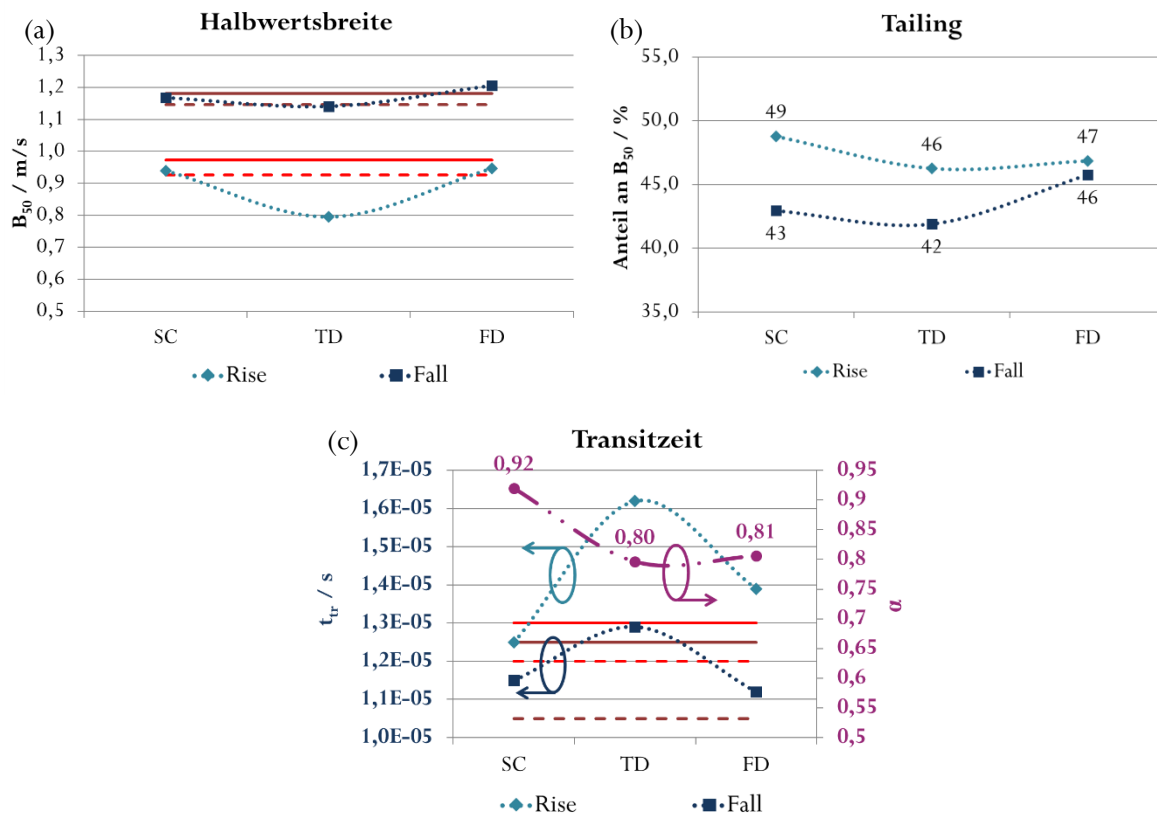


Abbildung 5.34: Halbwertsbreite B_{50} (a) und prozentuales Tailing (b) und Transitzeit t_{tr} sowie Gütefaktor α (c) für im Spin-Coating, Tiefdruck und Flexodruck hergestellte Proben des Halbleiters PIF8-TAA²⁷. Die Minimum- (gestrichelte rote Linie) und Maximumtoleranz (durchgezogene rote Linie) beziehen sich auf die *Rise*-Verteilung (hellrot) und die *Fall*-Verteilung (dunkelrot) der im Spin-Coating erzeugten Probe.

Transitzeit

Die Transitzeit t_{tr} ist für die Probe aus dem Tiefdruck am höchsten, siehe Abbildung 5.34 (c). Für *Rise* ist sie im Spin-Coating am niedrigsten, für *Fall* im Flexodruck. Interessant ist, dass der Gütefaktor α für Spin-Coating bei 0,92 liegt und für beide Druckverfahren bei ca. 0,8. Dies führt zu dem Schluss, dass in

gedruckten Halbleiterschichten die Güte der Grenzfläche schlechter ist als in im Spin-Coating erzeugten Schichten.

Mobilität

Die *dynamische Mobilität* ist sowohl bei Extraktion aus der Transitzeit t_{tr} als auch bei Extraktion aus der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ für die im Tiefdruck erzeugte Probe am geringsten. Vergleicht man dies mit den statisch ermittelten Werten, so ergibt sich der genau entgegengesetzte Trend. Die Mobilität ist für die Tiefdruckprobe am höchsten, während die Mobilität der Spin-Coating Probe am geringsten ist und die des Flexodrucks zwischen beiden Werten liegt, siehe Abbildung 5.35.

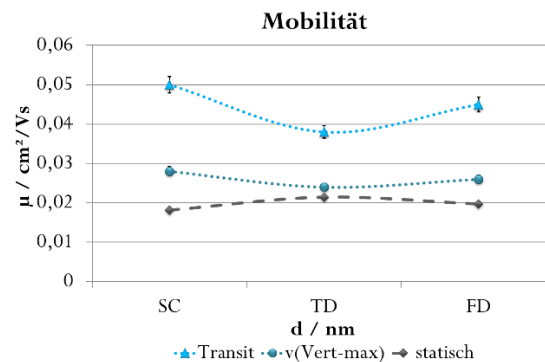


Abbildung 5.35: Dynamische und statische Mobilität μ für Transistoren aus dem Spin-Coating, Tiefdruck und Flexodruck²⁷ im Vergleich. Die Fehler für die statisch ermittelten Werte ergeben sich aus der Standardabweichung des Mittelwerts der einzelnen Transistoren, die der dynamisch ermittelten aus Gleichung 3.27. Aufgrund der Datenpunktgröße sind die Fehlerbalken nur für die Mobilität ermittelt aus der Transitzeit zu erkennen.

Zusammenfassung

Für Proben identischer Schichtdicke der drei Herstellungsverfahren Tiefdruck, Flexodruck und Spin-Coating verschiebt sich die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung also in der eben genannten Reihenfolge hin zu höheren Geschwindigkeiten. Für die im Tiefdruck erzeugte Probe ist die Verteilung am schmalsten. Der Gütefaktor α weicht eindeutig für Spin-Coating gegenüber den Druckverfahren ab. Die statische Mobilität zeigt interessanterweise den genau entgegengesetzten Trend der dynamischen Mobilität: Die Mobilität der gedruckten Proben ist höher als die der im Spin-Coating erzeugten und darunter ist die des Tiefdrucks am höchsten.

5.2.1.5 Einfluss des Beschichtungsprozesses für den Halbleiter SP400

Für den Halbleiter SP400 werden die Unterschiede zwischen Spin-Coating (SC) und Tiefdruck (TD) unter gleichbleibender Schichtdicke anhand von vier Proben untersucht: SC-1000 rpm (27 ± 2 nm), SC-1500 rpm (27 ± 6 nm), TD-100 % (27 ± 7 nm) und TD-80 % (26 ± 8 nm).

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

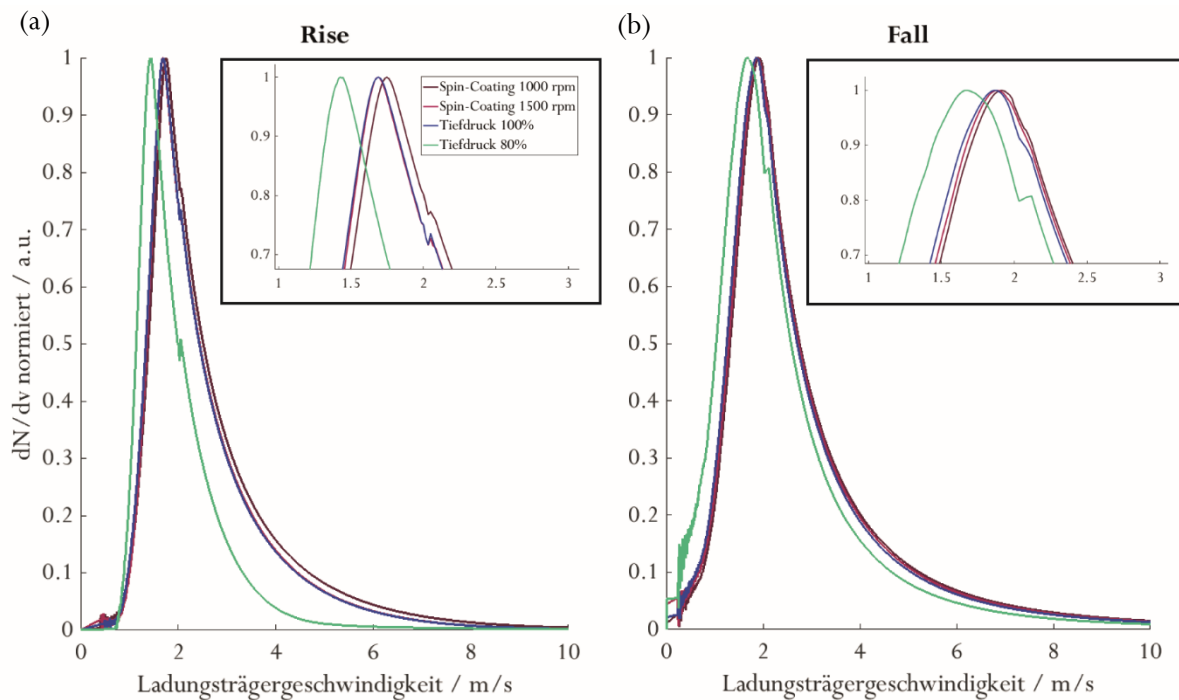


Abbildung 5.36: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* (a) und der abfallenden Flanke *Fall* (b) für zwei mittels Spin-Coating hergestellte und zwei mittels Tiefdruck hergestellte Proben des Halbleiters SP400²⁸. Erstere unterscheiden sich in der verwendeten Rotationsgeschwindigkeit, letztere in der Flächendeckung der Druckform. Alle Proben haben eine Schichtdicke von 27 nm.

Abbildung 5.36 zeigt die normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung aller vier Proben im Vergleich für *Rise* (a) und *Fall* (b). Bei *Rise* weichen die Verteilungen der Proben SC 1000 rpm und TD-80 % signifikant von den anderen beiden Verteilungen ab. Letztere sind nahezu identisch. Bei *Fall*

²⁸ Proben Halbleiter SP400 Spin-Coating: 0468 – 1000 rpm, 0469 – 1500 rpm; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.

Proben Halbleiter SP400 Tiefdruck GT+W Superproofer: 0490 – Druckform pHL140-VF-100, 0494 – Druckform pHL140-VF-80, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.

Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

weicht nur noch die Probe TD-80 % signifikant ab, siehe Abbildung A.7. Die signifikanten Abweichungen zeigen sich auch in den *Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$, siehe Abbildung 5.37 (a). Auch die *Breite der Verteilung* B_{50} weicht nur für TD-80 % signifikant bei *Rise* und *Fall* ab. Für *Rise* ergibt sich ein wesentlich schmalerer Peak, für *Fall* ein eindeutig breiterer. Von der Absolutgeschwindigkeit unabhängig betrachtet, erfolgt der Aufbau des Kanals für TD-80% also mit einem geringeren Spektrum an Ladungsträgergeschwindigkeiten. Die Form der Verteilung ist für *Fall* mit einem *Tailing* von 47 ± 1 % innerhalb der Messreihe konstant und annähernd achsensymmetrisch. Für *Rise* liegt allgemein ein *Fronting* vor, das sich innerhalb der Messreihe um 2,6 % unterscheidet. Abbildung 5.37 (d) zeigt, dass die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} für die Probe SC-1000 rpm am höchsten und die Probe TD-80 % am niedrigsten ist.

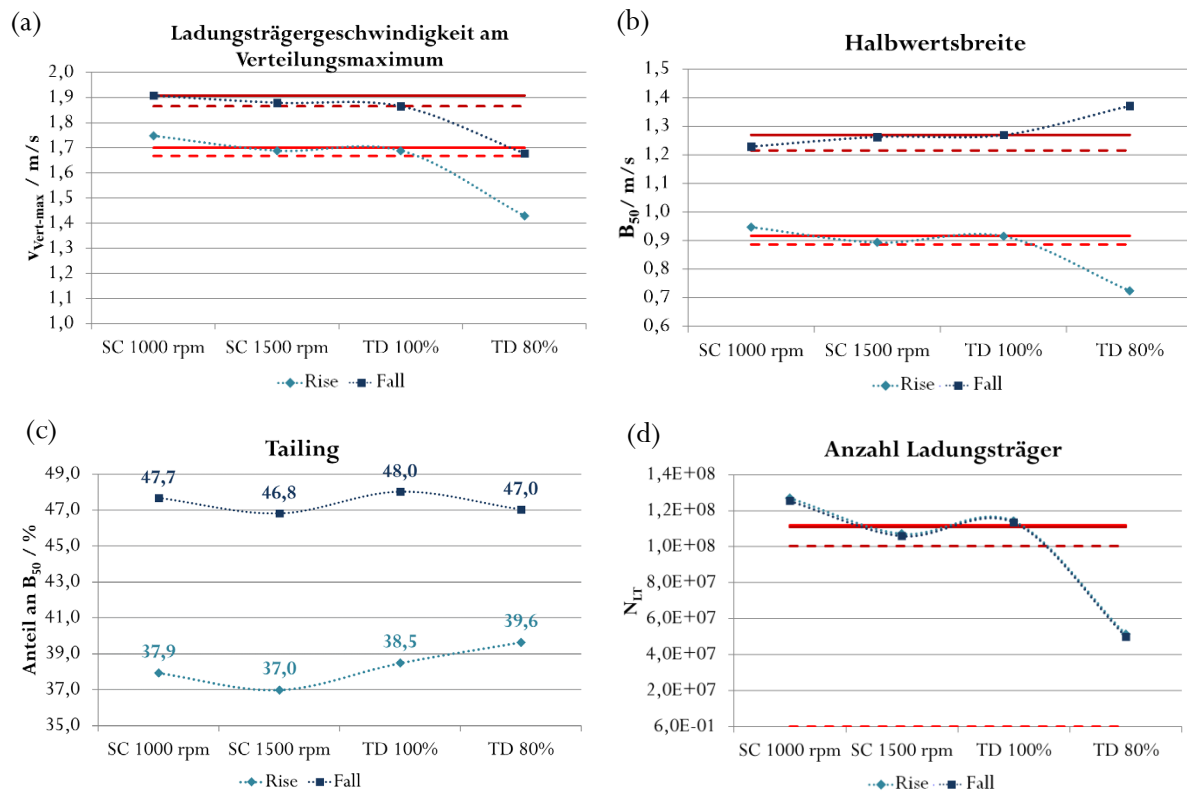


Abbildung 5.37: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Tailing (c) und Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (d) für je zwei im Spin-Coating hergestellte und zwei im Tiefdruck hergestellte Proben des Halbleiters SP400²⁸.

Transitzeit

Die Ununterscheidbarkeit der Proben SC-1500 rpm und TD-100 % zeigt sich auch in den *Transitzeiten* t_{tr} von *Rise* und *Fall*, siehe Abbildung 5.38. Abbildung 5.38 zeigt außerdem den *Gütefaktor* α . Dieser liegt für

die Proben aus dem Spin-Coating sowie die Probe TD 100% bei $\text{ca. } 0,77 \pm 0,02$, ist aber für TD-80% mit 0,64 deutlich geringer. Dies bedeutet, dass in Abhängigkeit der Flächendeckung der Druckform ein Gütefaktor analog zum Spin-Coating erreicht werden kann.

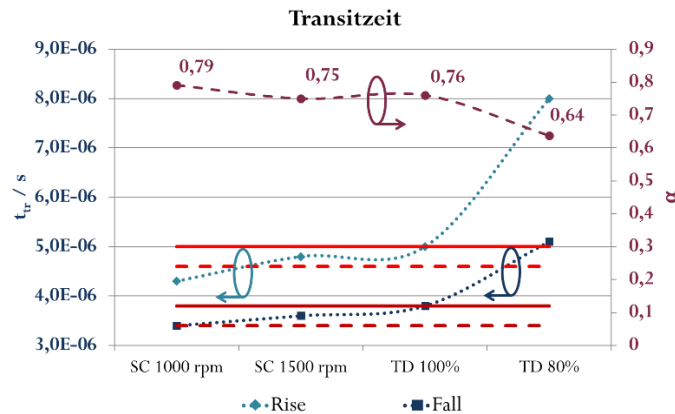


Abbildung 5.38: Transitzeit t_{tr} und der Gütefaktor α für je zwei im Spin-Coating und zwei im Tiefdruck hergestellte Proben des Halbleiters SP400²⁸. Vergleichend dargestellt sind die Werte für *Rise* und *Fall* sowie die Minimum- und Maximumtoleranzen in Bezug auf Probe SC 1500 rpm. Für Werte außerhalb dieser Grenzen wird eine Abweichung als signifikant deklariert.

Mit abnehmender Flächendeckung sinkt die Güte der Grenzfläche. Dies ist auf die Druckform an sich und die durch die größeren Abstände zwischen den abgesetzten Tropfen erschwerten Bedingungen im Leveling zurückzuführen, siehe Abbildung 5.39.

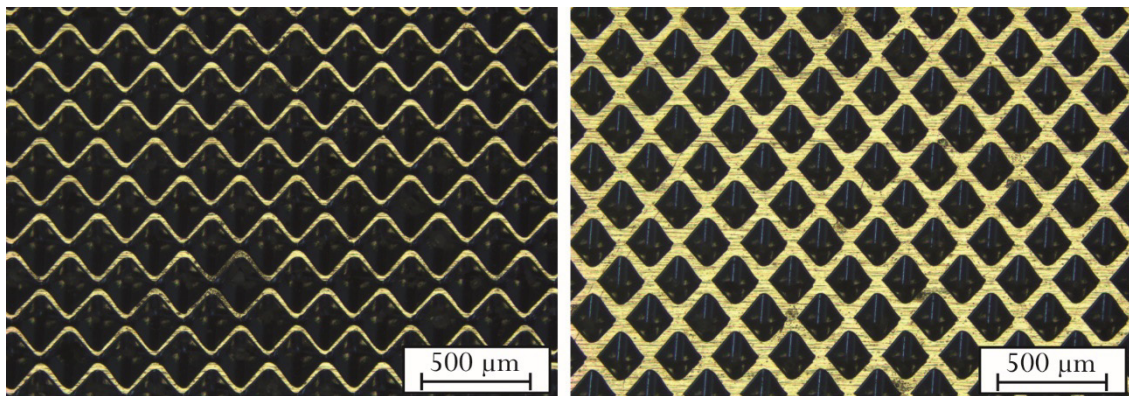


Abbildung 5.39: Mikroskopische Aufnahme (LEICA DM4000M, 5-fach vergrößert) einer Tiefdruckform mit einer Lineatur von 40 L/cm und einer Flächendeckung von 100 % (a) sowie 80 % (b). Gelblich erscheinen die Stege der Druckform, schwarz die Vertiefungen der Nöpfchen.

Mobilität

Abbildung 5.40 zeigt die *statische* und *dynamische* Mobilität im Vergleich. Die statische Mobilität zeigt signifikante Unterschiede zwischen den im Spin-Coating und den im Tiefdruck erzeugten Proben. Letztere haben eine um ca. $0,05 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ höhere Mobilität. Im dynamischen Verhalten kommt dies nicht zum Ausdruck. Hier weichen die Mobilitäten der Proben SC-1000rpm, SC-1500rpm und TD-100 % nicht signifikant voneinander ab. Die extrem hohen Mobilitäten der Probe TD-80 % sind hier anzuzweifeln. TD-80 % weist eine hohe Transitzeit t_{tr} auf, siehe Abbildung 5.38, und außerdem eine sehr hohe Schwellspannung von $-9,8 \text{ V}$. Hierdurch konvergiert der zweite Term im Nenner von Gleichung 3.5 gegen null und die dynamische Mobilität wird größer. In diesem Falle versagt das Modell zur Extraktion der dynamischen Mobilität. Das Beschichtungsverfahren an sich zeigt für die Proben SC 1000 rpm, SC 1500 rpm und TD-100% keinen Einfluss auf die dynamische Mobilität.

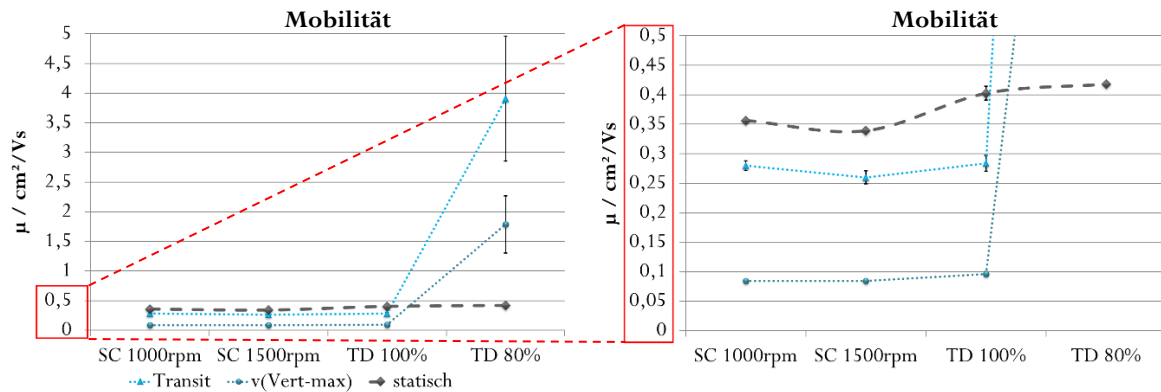


Abbildung 5.40: Statische und dynamische Mobilität μ für je zwei im Spin-Coating hergestellte und zwei im Tiefdruck hergestellte Proben des Halbleiters SP400²⁸. Die rechte Abbildung ist ein Zoom der Werte zwischen 0 und $0,5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich über die vier Proben des Halbleiters SP400 sagen: Die Verteilungen der Proben SC-1500 rpm sowie TD-100% weichen nicht signifikant voneinander ab. Die Unterschiede der Probe SC-1000 rpm zu den beiden genannten sind nur gering. Die Probe TD-80 % weicht vollständig signifikant ab bezüglich der Verteilungsbreite B_{50} , des Faktors α , der Transitzeit t_{tr} und den dynamischen Mobilitäten. Die statischen Mobilitäten zeigen hier überraschenderweise eine klare Zuordnung zwischen gedruckten und im Spin-Coating erzeugten Proben, wobei letztere die höheren Werte aufweisen.

5.2.1.6 Beurteilung der Hypothese 1

In der Einleitung dieses Abschnitts 5.2.1 wurde folgende Hypothese aufgestellt:

Für flüssigprozessierte amorphe Polymerhalbleiter hängen die statische und die dynamische Mobilität von aus ihnen hergestellten bottom-contact top-gate Transistoren einzig und allein von der Schichtdicke des Halbleiters ab. Dieser Zusammenhang gilt auch für die Ladungsträgergeschwindigkeit.

Anhand einer Schichtdickenvariation im Spin-Coating kann gezeigt werden, dass für den Halbleiter SP400, zwei in sich von der Schichtdicke unabhängige Plateaubereiche für das statische bzw. dynamische Verhalten bestehen. Das dynamische Verhalten, in Form der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und den aus ihr extrahierten Kennwerten, weicht in diesem Falle von den statischen und dynamischen Mobilitätswerten ab. Für erstere ergibt sich ein Plateau zwischen 27 und 67 nm (Bereich der unabhängigen Kennwerte (KW), siehe auch Zusammenfassung in Abschnitt 5.2.1.1), für letztere zwischen 20 und 27 nm (Bereich der unabhängigen Mobilitäten (MO)).

Auch für den Halbleiter PIF8-TAA hängt das dynamische Verhalten von der Schichtdicke des Halbleiters ab. Zwischen 40 und 85 nm Schichtdicke kann jedoch ein Plateau ermittelt werden (4 % Abweichung zwischen minimalem und maximalem Wert aus $v_{\text{Vert-max}}$), in dem die extrahierten Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung sowie die statische Mobilität nicht signifikant voneinander abweichen. Die höchste Mobilität wurde für alle Extraktionsarten bei 44 nm Schichtdicke ermittelt. Allgemein verschiebt sich mit zunehmender Schichtdicke die Verteilung hin zu höheren Geschwindigkeiten und sie wird breiter. Die Transitzeit t_{tr} weist ein Optimum auf, während der Gütefaktor α in Sättigung läuft.

Wird die Schichtdicke anhand des Feststoffgehaltes, welcher eine gleichzeitige Änderung der Viskosität bewirkt, beeinflusst, so zeigen sich wesentliche Unterschiede zwischen im Spin-Coating und im Tiefdruck erzeugten Proben des Halbleiters PIF8-TAA. Es kann aber festgestellt werden, dass es für die verschiedenen Feststoffgehalte einen Zusammenhang der Mobilität mit der Schichtdicke (28 - 146 nm) zu geben scheint, der unabhängig vom Beschichtungsverfahren ist.

Sowohl für den Halbleiter PIF8-TAA als auch für SP400 ergeben sich Unterschiede bei Proben identischer Schichtdicke aber unterschiedlichen Herstellungsprozesses. Sowohl die statische als auch die dynamische Mobilität zeigen Unterschiede zwischen den verschieden hergestellten Proben. Am Halbleiter PIF8-TAA kann gezeigt werden, dass sich neben einer kompletten Verschiebung der Verteilung (Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$, Transitzeit t_{tr}) auch die Breite und die

Form der Verteilung in Abhängigkeit des Herstellungsprozesses ändern. Der Gütefaktor α ist höher für im Spin-Coating erzeugte Proben als für gedruckte. Im Fall von Halbleiter SP400 weicht nur eine von vier Proben (TD 80%) signifikant an der ansteigenden und abfallenden Flanke ab; an der ansteigenden Flanke können zusätzlich signifikante Unterschiede zu einer weiteren Probe (SC 1000 rpm) festgestellt werden. Die Abweichungen liegen vor in der Position der Verteilung, der Transitzeit t_{tr} , der dynamischen Mobilität, der Breite und der Form der Verteilung. Interessanterweise zeigt das statische Verhalten bei SP400 im Gegensatz zum dynamischen Verhalten einen klaren Unterschied zwischen gedruckten und im Spin-Coating erzeugten Proben.

Das statische und das dynamische Verhalten organischer Feldeffekttransistoren hängt somit nicht einzig und allein von der Schichtdicke des Halbleiters ab. Der Beschichtungsprozess an sich fließt in die elektrische Güte der Schicht mit ein. Diese korreliert nicht zwingend mit der optischen Güte. Je nach Halbleiter und Messmethode existiert ein Optimum oder ein Plateaubereich für die Performance des Halbleiters. Diese hängen mit der Höhe der Elektroden und der damit verbundenen Injektionsfläche zusammen.

Die Hypothese wird somit verworfen.

5.2.2 Einfluss des Druckprozesses

Im Druckprozess stehen verschiedene Prozessparameter zur Einstellung einer optimalen Schicht zur Verfügung. Diese lassen sich in jene, die für eine Druckform fixe sind, und jene, die im laufenden Prozess variierbar sind, aufteilen. Am Beispiel des Tiefdrucks sind erstere die Lineatur, die Flächendeckung, der Rasterwinkel, der Stichelwinkel sowie die Näpfchentiefe. Diese Parameter sind auf der Form fest vorgegeben und lassen sich während des Versuchs nicht bzw. nur durch Tausch der Druckform variieren. Variable Parameter sind im Tiefdruck – und speziell am Fall des GT+W Superproofers – die Druckgeschwindigkeit, der Rakeldruck und der Presseurdruck. All diese Parameter beeinflussen den Grad an optischer Homogenität des Druckbildes. Ein wichtiger Punkt in der gedruckten Elektronik ist jedoch die Korrelation der messbaren optischen Güte mit der elektrischen Güte, d. h. die Beantwortung der Frage, ob eine scheinbar optisch perfekt homogene Schicht auch die beste Transistorperformance liefert. In diesem Zusammenhang stellt sich ebenfalls die Frage, ob die mit statischen Messungen erfassten Kennwerte die gefragte elektrische Güte erfassen können und ob die aus ihr erhaltenen Werte ausreichen, um Aussagen über die dynamische Performance treffen zu können. Für die experimentelle Prüfung wird folgende Hypothese aufgestellt:

Hypothese 2:

Statische und optische Charakterisierungsmethoden reichen aus, um einen Druckprozess anhand der Druckgeschwindigkeit und der Druckformparameter zu optimieren. Die erhaltenen Prozessfenster lassen sich auf das dynamische Verhalten übertragen, d.h. die statische Charakterisierung reicht aus, um Transistoren für Schaltungen auszuwählen.

Die Auswahl der zur Untersuchung dieser Hypothese im Tiefdruck gewählten Parameter Druckgeschwindigkeit, Lineatur, Flächendeckung und Ausrichtung wird im Folgenden begründet:

Die Druckgeschwindigkeit beeinflusst die optische Homogenität der Halbleitenden Schichten, siehe Abbildung 5.44. Sie geht in die Levelingzeit druckspaltbezogener Inhomogenitäten (Viscous Fingering) mit V_p^{-2} ein (Ganz, 2016). Je höher die Druckgeschwindigkeit, desto geringer die Levelingzeit. Sie ist außerdem der am einfachsten anzupassende Parameter im Rahmen dieser Untersuchungen, da sie variabel an der Maschine eingestellt werden kann.

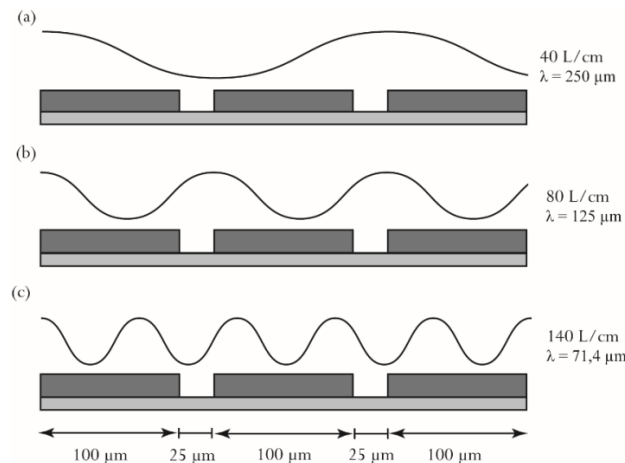


Abbildung 5.41: Theoretische, aus der Lineatur resultierende Welligkeiten einer Druckform mit 100 % Flächendeckung und einem theoretischen Rasterwinkel von 0° im Vergleich zu den Elektrodengrößen und Transistorkanälen für parallel ausgerichtete Transistoren. In hellgrau dargestellt ist das Substrat, in dunkelgrau die Source-Drain-Elektroden als Ausschnitte des Querschnitts einer interdigitalen Struktur.

Das Homogenisieren von druckformbedingten Welligkeiten im Nassfilm, das Leveln, kann durch die zugehörige Levelingzeit beschrieben werden, siehe Gleichung 2.9 in Abschnitt 2.3.1. In diese gehen die Fluidparameter Viskosität η linear und die Oberflächenspannung σ reziprok ein. Die filmspezifische dominierende Wellenlänge geht mit λ^4 und die mittlere Schichtdicke mit h_0^{-3} ein. Der Einfluss der Viskosität wurde bereits in Abschnitt 5.2.1.4 vorgestellt. Die Wellenlänge kann und wird in dieser Versuchsreihe erheblich durch die Lineatur und die Flächendeckung beeinflusst werden. Die Lineatur gibt vor, wie viele Druckpunkte pro cm von der Druckform abgesetzt werden, die Flächendeckung gibt die Größe der freien Fläche im Verhältnis zu der durch die Druckpunkte bedeckten Fläche vor. Beide Parameter haben Einfluss auf die Welligkeit der entstehenden Schicht, siehe Abbildung 5.41.

Ebenfalls von Interesse im Rahmen der Untersuchung der Performanceabhängigkeit vom Druckprozess ist die Frage nach dem Einfluss der Ausrichtung der Transistoren zur Druckrichtung, siehe Abbildung 5.42. Während des Druckprozesses wird das Fluid im Tiefdruck aus in Linien angeordneten Nöpfchen auf das Substrat übertragen. Diese Nöpfchen besitzen eine bestimmte Frequenz, die Rasterweite oder Lineatur, genannt wird. Allerdings sind diese Linien von Nöpfchen nicht senkrecht oder parallel zur Rotationsachse des Zylinders aufgebracht, sondern in einem bestimmten Winkel, dem sogenannten Rasterwinkel. Dennoch werden während des Druckvorgangs die Nöpfchen sequentiell entlang von Linien auf der Zylinderoberfläche entleert. Dieser Effekt gibt den Schichtdickeninhomogenitäten eine bestimmte Frequenz vor, die aufgrund der Winkelung nicht der Lineatur entspricht. Liegen diese Wellenlängen in den Größenordnungen der Transistorstrukturen, so kann es vorkommen, dass in identisch gedruckten Transistoren unterschiedliche

Schichtdickenverhältnisse auftreten. Des Weiteren wird den Polymeren eine Vorzugsrichtung der Orientierung im Druck vorgegeben, siehe Abschnitt 382.3.1.

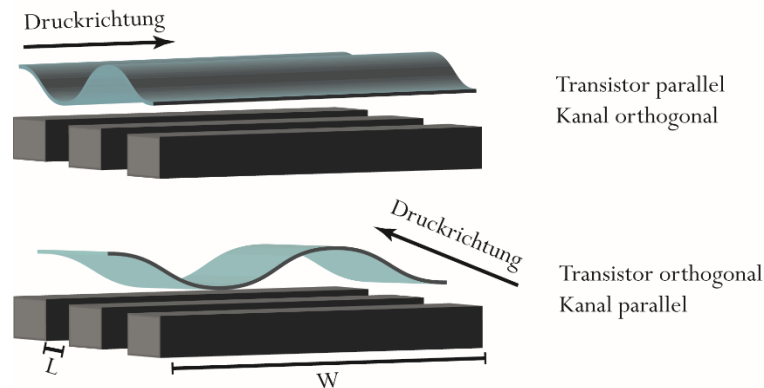


Abbildung 5.42: Ausrichtung des Transistors und somit des Kanals zur Druckrichtung. In grau dargestellt die Source- und Drain-Elektroden, in graublau die gedruckte wellige Halbleiterschicht.

Im Rahmen der Untersuchung des Einflusses des Druckprozesses soll ebenfalls der Flexodruck betrachtet werden. Für dieses, als Alternative zum Tiefdruck bestehende Verfahren wurde bereits festgestellt, dass sich organische Bestandteile aus den Flexodruckformen (Klischees) herauslösen und sich in den Halbleiterschichten niederschlagen, siehe Abschnitt 2.3.5. Der Einfluss dieser Verunreinigungen soll anhand folgender Hypothese untersucht werden:

Hypothese 3

Der Flexodruck – unter Verwendung des Klischeematerials Nyloflex ACE – ist – in Kombination mit PIF8-TAA gelöst in Mesitylen – zur Erzeugung organischer Halbleiterschichten ungeeignet. Das Quellen der Druckform sowie die durch diesen Lösemittelkontakt gelösten organische Verunreinigungen aus dem Klischee beeinflussen die Performance des Transistors.

5.2.2.1 Einfluss der Druckgeschwindigkeit für den Halbleiter PIF8-TAA

Der Einfluss der Druckgeschwindigkeit v_{Druck} wird für den Halbleiter PIF8-TAA anhand von 7 Geschwindigkeiten getestet: $0,03 - 0,3 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5$ m/s. Die Geschwindigkeit 3 m/s wurde als Referenz gewählt, da für diese Druckgeschwindigkeit die meisten Erfahrungswerte aus Vorversuchen vorhanden waren. Die ersten beiden Geschwindigkeiten wurden aufgenommen, um eine Abstufung von Faktor 10 zeigen zu können. Der Höchstwert 5 m/s wurde gewählt, da dies die maximale mit dem GT+W Superproofer erreichbare Druckgeschwindigkeit ist. Es wurde eine Druckform mit 80 L/cm und 80 % Flächendeckung eingesetzt, da die größeren Einflüsse auf die Kennwerte für 80 % Flächendeckungen beobachtet wurden und die Einflüsse der Druckgeschwindigkeit aus Vorversuchen als sehr gering bis nicht vorhanden bekannt sind. Im Rahmen dieser Versuche wurden alle Proben zweimal identisch hergestellt, d. h. bei jedem Abdruck wurden zwei identische Proben erzeugt. Die ermittelten Werte beziehen sich auf die gemittelten Messdaten von je 8 Transistoren (4 pro Substrat). Die Proben waren orthogonal ausgerichtet.

Schichtdicke

Die durch Erhöhung der Druckgeschwindigkeit erzeugten Unterschiede in den Schichtdicken sind in Abbildung 5.43 dargestellt. Für eine Druckgeschwindigkeit von 0,03 m/s ist die Schichtdicke mit 38,4 nm am höchsten. Für höhere Druckgeschwindigkeiten schwankt sie um 30,5 nm. Dieser Bereich liegt unterhalb des in Abschnitt 5.2.1.2 definierten Plateaubereichs. Allerdings ist anzumerken, dass für den Bereich kleiner 40 nm nur zwei Werte vorhanden gewesen sind. Über die Schichtdickenabhängigkeit in diesem Bereich kann somit bisher keine Aussage getroffen werden.

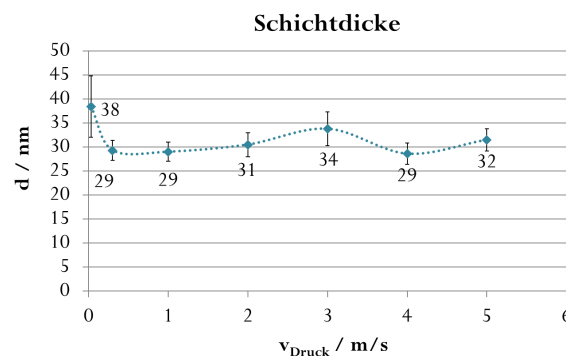


Abbildung 5.43: Schichtdicken d in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit v_{Druck} für den Halbleiter PIF8-TAA.

Mit dem Ändern der Druckgeschwindigkeit geht jedoch nicht nur eine Änderung der Schichtdicke einher. Auch die Filmbildung wird maßgeblich beeinflusst. Abbildung 5.44 zeigt

Mikroskopaufnahmen der in dieser Versuchsreihe erzeugten Proben auf Glas. Es ist klar zu erkennen, dass mit zunehmender Druckgeschwindigkeit die Homogenität der Halbleiterschicht zunimmt. In den Proben niedriger Druckgeschwindigkeiten zeigen sich klare Linienmuster entlang der Druckrichtung. Für die ersten beiden Proben ist der Film nicht vollständig geschlossen. Diese Linienmuster gehen in eine wolkenartige Struktur über, die ab 3 m/s mit dem Mikroskop nicht mehr zu erkennen ist.

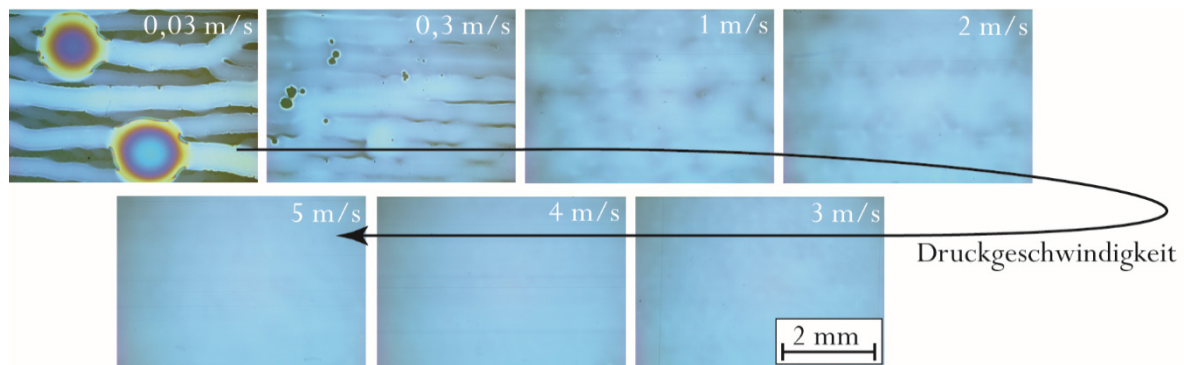


Abbildung 5.44: Mikroskopaufnahmen der Halbleiterschicht PIF8-TAA in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit v_{Druck} (LEICA DM4000M, 2,5-fache Vergrößerung).

Eine Besonderheit bei Variation der Druckgeschwindigkeit ergibt sich durch die Verwendung der Labordruckmaschine Superproofer: Hier wird das Fluid auf das an den bereits rotierenden Tiefdruckzylinder gepresste Rakelmesser dosiert. Von dort fließt es an den Tiefdruckzylinder und wird in die Gravur gepresst. Ist dieser vollständig eingefärbt, wird der Druckvorgang gestartet und der Zylinder beginnt seine Geschwindigkeit auf die Druckgeschwindigkeit anzupassen. Hat er diese erreicht, wird das auf dem Schlitten befestigte Substrat von einem definierten Startpunkt zwischen dem Tiefdruckzylinder und dem Presseur durchgeleitet. Bei langsamen Geschwindigkeiten dauert dieser Vorgang sehr lange (im einstelligen Sekundenbereich). Die Verdunstung von Lösemittel aus dem sehr dünnen Fluidfilm kann somit bereits auf dem Zylinder einsetzen.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Abbildung 5.45 zeigt die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen als Funktion der Druckgeschwindigkeit v_{Druck} . Die Verteilung der Probe 0,03 m/s weicht stark von den anderen Verteilungen ab. Sie weist außerdem einen hohen Rauschanteil auf. Allgemein verschiebt sich die gesamte Verteilung und mit zunehmender Druckgeschwindigkeit zu höheren Ladungsträgergeschwindigkeiten hin. Bei Betrachtung der *Ladungsträgergeschwindigkeit am*

Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$, siehe Abbildung 5.46 (a), fällt auf, dass diese für Werte > 2 m/s bei *Rise* und > 1 m/s bei *Fall* nicht signifikant von der Referenz 3 m/s abweichen. Sie sind somit nicht unterscheidbar.

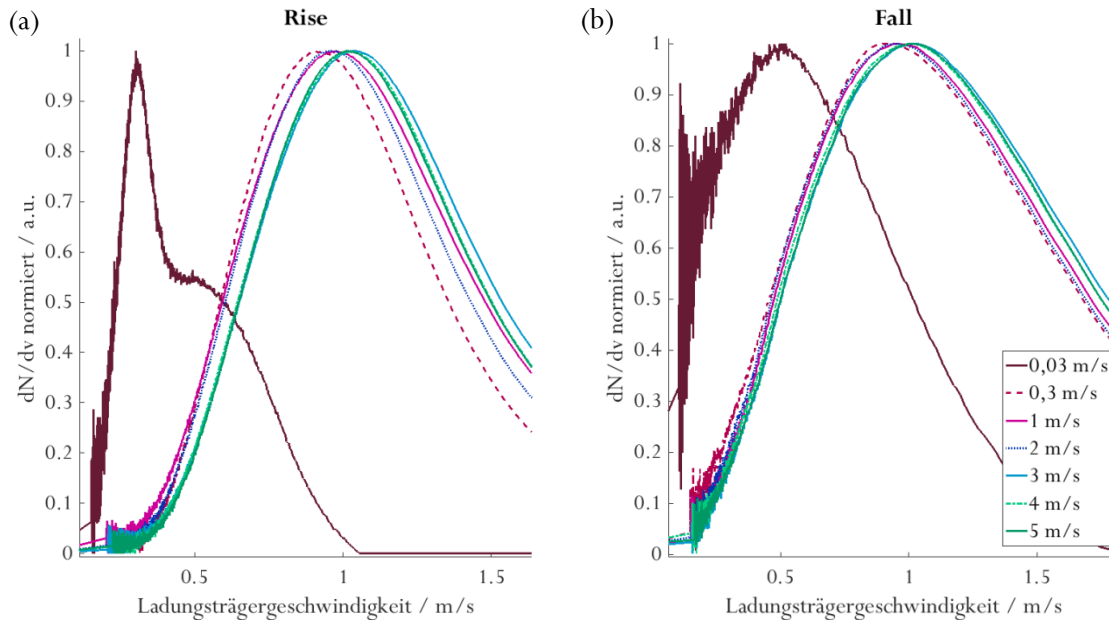


Abbildung 5.45: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung als Funktion der Druckgeschwindigkeit v_{Druck} für sowohl die ansteigende Flanke *Rise* (a) als auch die abfallende Flanke *Fall* (b) für den Halbleiter PIF8-TAA²⁹. Sowohl bei *Rise* (a) als auch bei *Fall* (b) zeigt sich ein stark abweichendes Verhalten der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der Druckgeschwindigkeit 0,03 m/s.

Dies spiegelt sich ebenso in den Halbwertsbreiten B_{50} (b) wider. Diese sind außerdem für *Fall* um ca. 0,3 m/s größer als für *Rise*. Für die Probe mit 0,03 m/s konnte kein Breitenwert, unter den in Abschnitt 3.2.2.2 genannten Grenzen, extrahiert werden. Die Form der Verteilung ändert sich nicht im Zusammenhang mit den Druckgeschwindigkeiten. Die Verteilungen sind annähernd symmetrisch aufgebaut mit einer leichten Tendenz zum Fronting, siehe Abbildung A.9 (a). Auch die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} , Abbildung A.9 (b), ist für *Fall* und *Rise* – wie oben beschrieben – ab 2 m/s nicht unterscheidbar.

²⁹ Proben Halbleiter PIF8-TAA Tiefdruck GT+W Superproofer: 0430+0431 – $v_{\text{Druck}}=0,03$ m/s, 0432+0433 – $v_{\text{Druck}}=0,3$ m/s, 0434+0435 – $v_{\text{Druck}}=1$ m/s, 0436+0437 – $v_{\text{Druck}}=2$ m/s, 0438+0439 – $v_{\text{Druck}}=3$ m/s, 0440+0441 – $v_{\text{Druck}}=4$ m/s, 0442+0443 – $v_{\text{Druck}}=5$ m/s, Druckform pHL80-VF-80, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.

Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

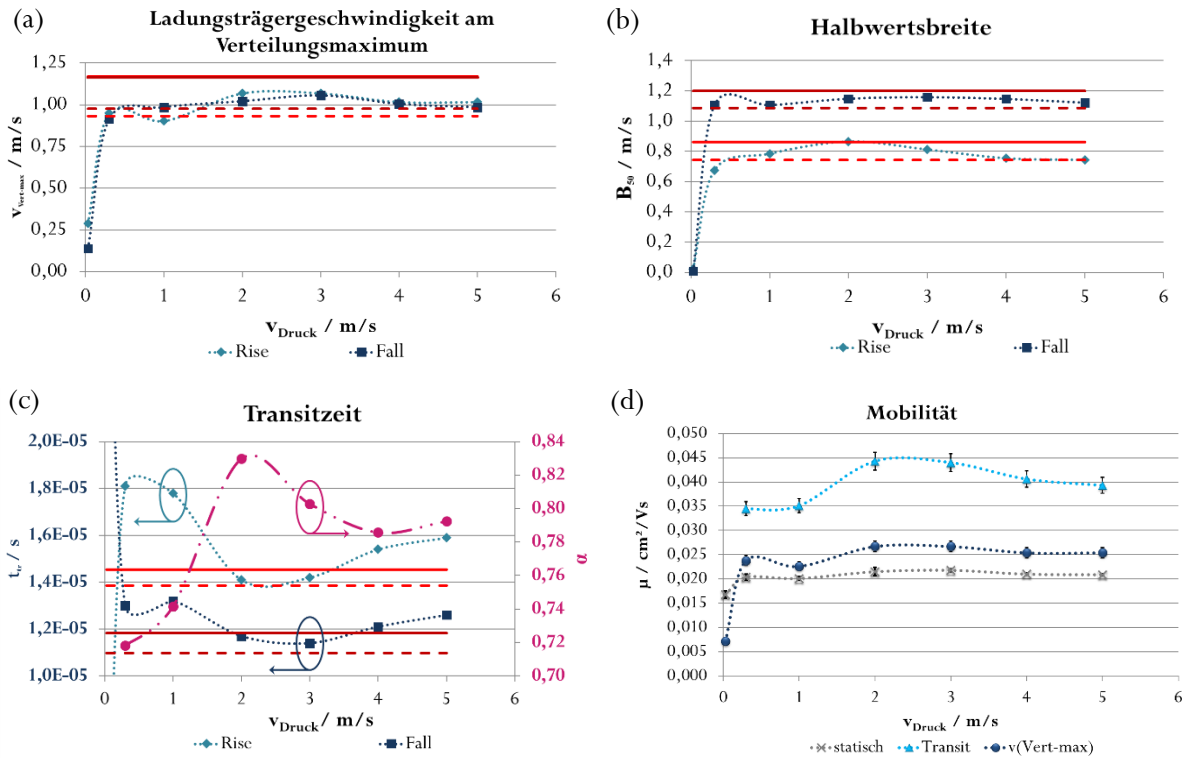


Abbildung 5.46: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Transitzeit t_{tr} (c) und Mobilität μ (d) in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit für die ansteigende sowie abfallende Flanke *Rise* bzw. *Fall* des Halbleiters PIF8-TAA²⁹.

Transitzeit

In den *Transitzeiten* t_{tr} und im *Gütefaktor* α unterscheiden sich die Werte für die verschiedenen Druckgeschwindigkeiten jedoch signifikant, siehe Abbildung 5.46 (c). Die Werte der mit 0,03 m/s gedruckten Probe sind im Plot nicht dargestellt. Sie betragen 0,1 μs für *Rise* und 32,7 μs für *Fall*. Ein Optimum zeigt sich für Druckgeschwindigkeiten von 2 und 3 m/s. Hier sind die Transitzeiten – auch ununterscheidbar – am niedrigsten bei 14 μs für *Rise* bzw. 11 μs für *Fall*. Für höhere und niedrigere Druckgeschwindigkeiten liegen die Transitzeiten höher, wobei sich eine Erniedrigung der Druckgeschwindigkeit stärker auswirkt als eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit. Der Gütefaktor α ist bei 2 m/s am höchsten. Auch er weist für die niedrigen Druckgeschwindigkeiten schlechtere (niedrigere) Werte auf als für hohe Druckgeschwindigkeiten.

Mobilität

Da die *dynamische Mobilität* im Falle vorgespannter Gates von der Schwellspannung unabhängig ist, fließen die Transitzeit t_{tr} und die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ direkt

reziprok in die Mobilität ein. In Abbildung 5.46 (d) ist ersichtlich, dass die Mobilität, berechnet aus der Transitzeit, ein Optimum bei 2 und 3 m/s zeigt. Die Mobilität der häufigsten Ladungsträger ist annähernd konstant ($\Delta_{\text{Min-Max}} = 15\%$), zeigt aber eine leichte Erhöhung bei 2 und 3 m/s. Die *statisch ermittelte Mobilität* ist für Geschwindigkeiten $> 0,03$ m/s konstant ($\Delta_{\text{Min-Max}} = 8\%$). Für die Optimumsgeschwindigkeiten 2 und 3 m/s beträgt die aus der Transitzeit ermittelte Mobilität $0,044 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, die der häufigsten Ladungsträger $0,027 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ und die statisch ermittelte $0,022 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Die statisch ermittelte Mobilität ist also um Faktor 2 geringer als die dynamisch ermittelte. Bei Betrachtung der Schwellspannung, siehe Anhang A.1, fällt auf, dass diese für Geschwindigkeiten höher 0,03 m/s um 7,5 V schwankt. Eine Ausnahme bildet der sehr niedrige Wert bei 4 m/s ($3,6 \pm 2,9 \text{ V}$).

Zusammenfassung

Es zeigt sich somit, dass für das dynamische Verhalten unter vorgespanntem Gate für im Tiefdruck erzeugte Schichten des Halbleiters PIF8-TAA aus einer 2 wt.-%igen Lösung in Mesitylen ein Optimum in der Druckgeschwindigkeit bei 2 und 3 m/s existiert. Da sowohl die Schwellspannung (6,9 V statt 8,1 V) als auch der Faktor α (0,83 statt 0,80) für die Probe mit 2 m/s nur geringfügig besser abgeschnitten haben und die sonstigen Werte aber ununterscheidbar sind, kann eine Druckgeschwindigkeit von 3 m/s als Referenzwert beibehalten werden. Anzumerken ist, dass eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit zwischen 1 und 5 m/s für alle Kennwerte außer der Transitzeit und der statischen Mobilität keinen Unterschied zeigt. Eine Veränderung um Faktor 10 bzw. 100 zeigt jedoch eine erhebliche Verschiebung zu niedrigeren Geschwindigkeiten hin.

5.2.2.2 Einfluss der Druckgeschwindigkeit für den Halbleiter SP400

Eine analoge Versuchsreihe zu Abschnitt 5.2.2.1 wurde für den Halbleiter SP400 durchgeführt. Allerdings diente hier die höchste an der Druckmaschine wählbare Geschwindigkeit von 5 m/s als Referenz. Diese wurde in Vorversuchen als diejenige Geschwindigkeit ermittelt, welche die optisch homogensten Schichten erzeugt. Es ergaben sich dadurch anstelle von 0,03 und 0,3 m/s Geschwindigkeiten von 0,05 und 0,5 m/s. Auch hier wurden pro Abdruck zwei Proben erzeugt und die Messdaten aus 8 Transistoren³⁰ gemittelt. Zum Einsatz kam eine Druckform mit 140 L/cm. Es wurde

³⁰ Mit Ausnahme von 5 m/s hier hatte die B-Probe 100 % defekte Transistoren. Es lag ein Prozessfehler vor, der nicht geklärt werden konnte.

das die Transistorflächen enthaltende Layout (pHL140-L-100) mit 100 % Flächendeckung verwendet. Die Transistoren waren parallel zur Druckrichtung ausgerichtet. Dies war durch die Verwendung der Layouts der Transistorflächen durch die Druckform so vorgegeben.

Schichtdicke

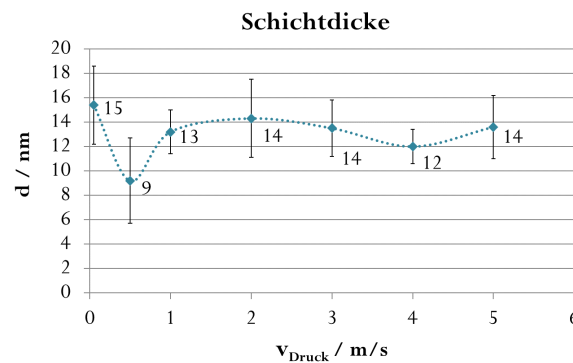


Abbildung 5.47: Schichtdicken d des Halbleiters SP400 in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit.

Abbildung 5.47 zeigt die ermittelten Schichtdicken (Dektak, siehe Abschnitt 4.7) in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit. Die Schichtdicken betragen im Mittel für alle Geschwindigkeiten 13,0 nm und weichen nicht signifikant voneinander ab. Die Probe für 0,5 m/s weist eine niedrigere Schichtdicke mit sehr hoher Standardabweichung auf. Die hohen Standardabweichungen innerhalb der Messreihe weisen darauf hin, dass die Bestimmung der Schichtdicken dieser Art fehlerbehaftet ist. Die ermittelten Werte liegen noch unterhalb des in Abschnitt 5.2.1.1 definierten Bereichs MO. Eine Aussage zur Schichtdickenabhängigkeit der Mobilität kann somit nicht getroffen werden.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Generell weisen die Transistoren dieser Versuchsreihe eine sehr gute Übereinstimmung im dynamischen Verhalten auf. Abbildung 5.48 zeigt die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen der 8 Transistoren der Proben mit 5 m/s, die abhängig vom Substrat mit Punkten oder Strichen codiert sind, sowie deren gemittelte Verteilung. Die Verteilungen verlaufen fast deckungsgleich. Die Abweichungen sind sehr gering, was sich in niedrigen Toleranzgrenzen widerspiegelt.

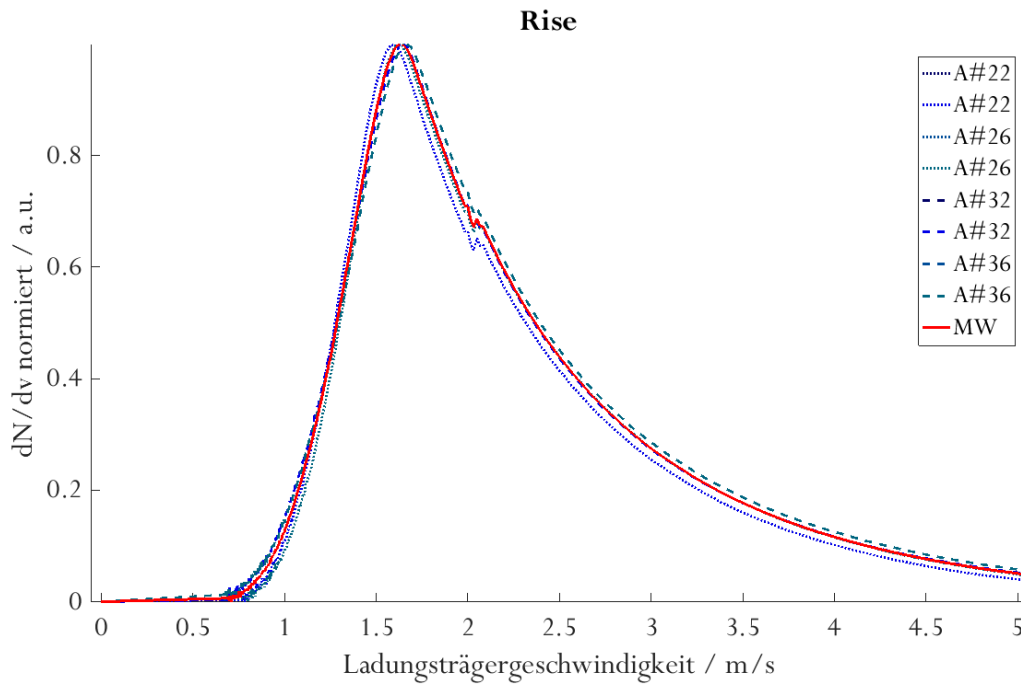


Abbildung 5.48: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen der 8 bewerteten Transistoren sowie deren Mittelwert für eine Druckgeschwindigkeit von 5 m/s des Halbleiters SP400³¹.

Die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ schwankt für Rise über alle Druckgeschwindigkeiten um $1,58 \pm 0,06$ m/s, siehe Abbildung 5.49 (a). Von der Referenz 5 m/s weichen die Proben bei 2 und 0,5 m/s nicht signifikant ab. Allgemein ist eine leichte Zunahme der Ladungsträgergeschwindigkeiten mit zunehmender Druckgeschwindigkeit zu beobachten. Bei Fall wird Identisches bei höheren Absolutgeschwindigkeiten beobachtet. Auch die Breite der Verteilung B_{50} in (b) ändert sich nicht wesentlich mit ansteigender Druckgeschwindigkeit (Rise: $0,88 \pm 0,03$ m/s; Fall: $1,30 \pm 0,05$ m/s). Selbiges gilt für die Form der Verteilung. Die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} ändert sich zwar signifikant für 0,05, 1 und 4 m/s, zeigt jedoch keinen direkten Zusammenhang zur Druckgeschwindigkeit, siehe Abbildung A.10 (a).

Transitzeit

Die Transitzeit t_{tr} und der Gütefaktor α , dargestellt in Abbildung 5.49 (c), zeigen die gleichen signifikanten Abweichungen zur Referenz der Druckgeschwindigkeit 5 m/s. Die niedrigsten und auch nicht

³¹ Proben Halbleiter SP400Tiefdruck: 0451+0452 – $v_{Druck}=0,05$ m/s, 0453+0454 – $v_{Druck}=0,5$ m/s, 0455+0456 $v_{Druck}=1$ m/s, 0457+0458 – $v_{Druck}=2$ m/s, 0459+0460 – $v_{Druck}=3$ m/s, 0461+0462 – $v_{Druck}=4$ m/s, 0463+0464 – $v_{Druck}=5$ m/s, Druckform pHL140-VF-100, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

unterscheidbaren Transitzeiten sowie gleichzeitig die höchsten Gütefaktoren weisen die Proben der Druckgeschwindigkeiten 0,5 - 2 und 5 m/s auf.

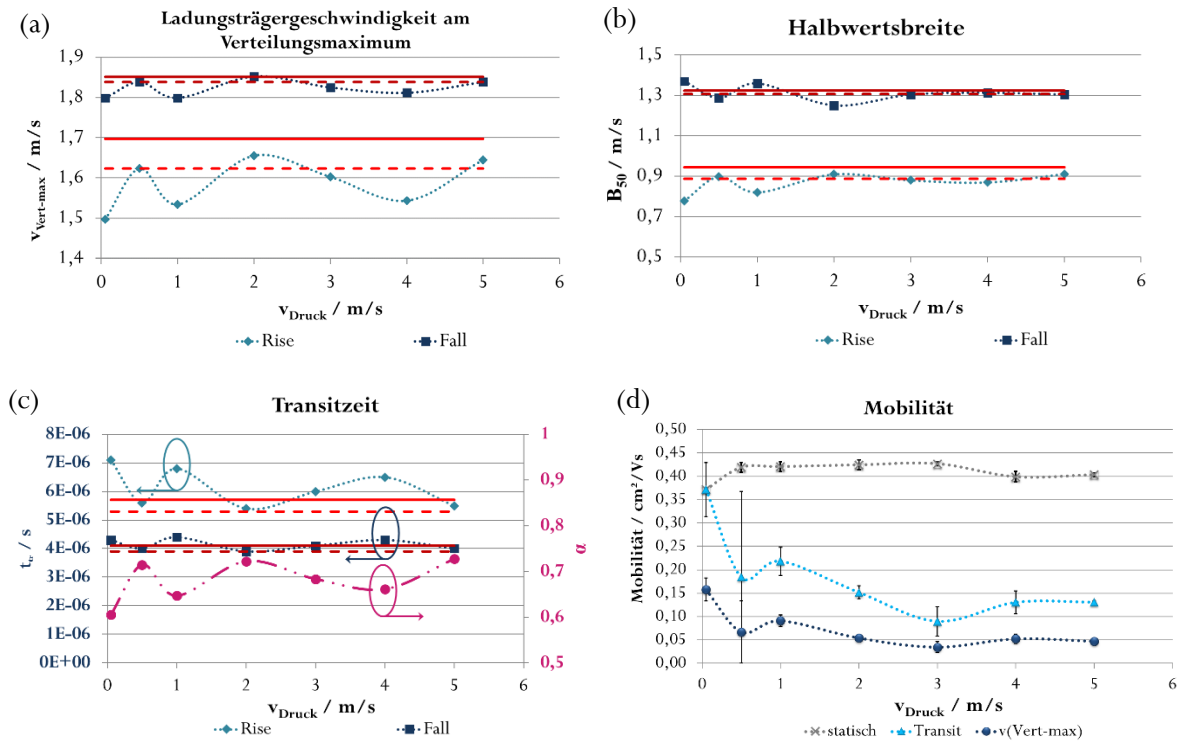


Abbildung 5.49: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Transitzeit t_{tr} sowie Gütefaktor α (c) und Mobilität μ (d) in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit für den Halbleiter SP400³¹.

Mobilität

Die in Abbildung 5.49 (d) gezeigte *dynamische Mobilität* ist für Druckgeschwindigkeiten zwischen 0,05 und 1 m/s am höchsten. Bei diesen Druckgeschwindigkeiten wird jedoch eine Schwellspannung höher 7,5 V verzeichnet und die Mobilität somit kritisch betrachtet. Für die übrigen Druckgeschwindigkeiten liegen die Mobilitäten zwischen 0,15 und 0,09 cm^2/Vs für die Transitzeit und zwischen 0,054 und 0,035 für die Ladungsträger mit der häufigsten Ladungsträgergeschwindigkeit. Die *statischen Mobilitäten* sind konstant für Druckgeschwindigkeiten von 0,5 bis 3 m/s bei 0,42-0,43 cm^2/Vs und für 4 und 5 m/s bei 0,40 cm^2/Vs . Die statisch ermittelte *Schwellspannung* nimmt mit ansteigender Druckgeschwindigkeit ab, siehe Abbildung A.10 (b). Eine Ausnahme bildet hier der niedrige Wert der Druckgeschwindigkeit 3 m/s von 5,6 V.

Zusammenfassung

Für den Halbleiter SP400 gestaltet sich die Beurteilung der Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit schwierig, da keine klaren Trends oder Optima erkennbar sind. Für die statische Mobilität ergeben sich zwei Plateaus zwischen 0,5 und 3 m/s (2 % Abweichung) sowie für 4 und 5 m/s (1 % Abweichung). Für Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung ergeben sich zwei Optima bei 2 und 5 m/s. Die dynamische Mobilität erreicht ein Plateau zwischen 2 und 5 m/s (3 m/s ausgenommen) mit 14 % Abweichung für die Transitzeit und 13 % Abweichung für die häufigsten Ladungsträger.

5.2.2.3 Einfluss der Druckformparameter und der Ausrichtung für den Halbleiter SP400

Die Vorform, die der Nassschicht durch die Druckform beim Übertragen mitgegeben wird, beeinflusst die Güte der finalen Halbleiterschicht maßgeblich. Eine Tiefdruckform charakterisiert sich, wie einleitend beschrieben, über ihre Lineatur (L/cm), ihre Flächendeckung (%) sowie die Form und Tiefe der gravierten Näpfchen. Des Weiteren spielt die Ausrichtung der Transistorkanäle zur Druckrichtung beim Beschichten eine Rolle. Nach Vorversuchen fiel die Wahl auf die beiden Extrema 0 (parallel) und 90° (orthogonal). Beide Proben wurden zusammen in einem Abdruck hergestellt, um die Vergleichbarkeit zu erhöhen. Die Kanäle verlaufen senkrecht zu den Elektroden – genauer gesagt zu der längeren Seite der Elektroden – zwischen denen sie entstehen, siehe auch Abbildung A.16. Um die im Druckprozess auftretenden Größen besser beschreiben zu können, richtet sich die Nomenklatur hier nicht nach den Kanälen, sondern nach den Transistoren. Sie ergibt sich im Rahmen dieser Arbeit somit zu: parallel (die Elektroden verlaufen parallel zur Druckrichtung, der Kanal verläuft senkrecht zur Druckrichtung) und orthogonal (die Elektroden verlaufen orthogonal zur Druckrichtung, der Kanal verläuft parallel zur Druckrichtung), siehe auch Abbildung 5.42.

Im Folgenden werden die Einflüsse der Parameter Flächendeckung und Ausrichtung anhand von drei Druckformen, die sich nur in ihrer Lineatur unterscheiden (40, 80 und 140 L/cm), untersucht. Das Übertragungsvolumen, die Näpfchenform sowie der Stichel- und Rasterwinkel sind je Flächendeckung gleich. Die Gravurparameter der Sleeves mit 80 und 140 L/cm sind in den Basisverfahren beschrieben, siehe Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 in Abschnitt 4.6.2, die der 40 L/cm-Form sind in Tabelle 5.16 gegeben. Die übrigen Versuchsparameter entsprechen den in Abschnitt 4.6.2 beschriebenen.

Tabelle 5.16: Gravurparameter des Sleeves mit einer Lineatur von 40 L/cm.

Register	Rasterweite	Stichelwinkel	Flächendeckung
pHL40-VF-100	40 L/cm	120 °	100%
pHL40-L-100	40 L/cm	120 °	100%
pHL40-VF-80	40 L/cm	120 °	80%
pHL40-L-80	40 L/cm	120 °	80%

Die Auswertung erfolgt stets in Abhängigkeit der Lineatur, einmal als Funktion der Ausrichtung und einmal als Funktion der Flächendeckung. Diese Versuchsreihen wurden für beide Halbleiter analog durchgeführt. Zunächst werden die Ergebnisse für den Halbleiter SP400 vorgestellt.

Schichtdicke

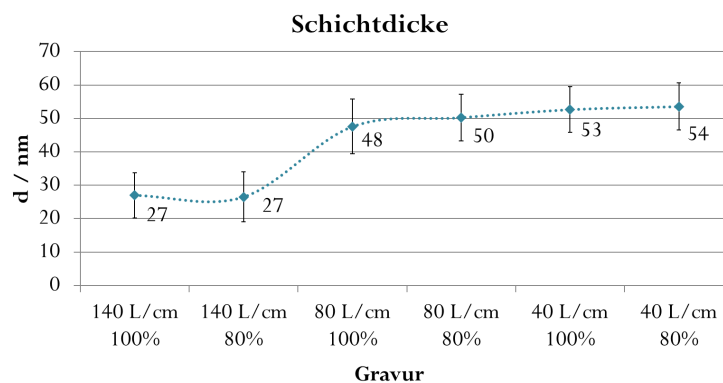


Abbildung 5.50: Schichtdicke d (Dektak, siehe Abschnitt 4.7) in Abhängigkeit der Gravur für den Halbleiter SP400 (Fluid ohne weitere Modifikationen verwendet). Die Fehlerbalken ergeben sich aus der Standardabweichung der zehn gemittelten Messwerte.

Abbildung 5.50 zeigt die Schichtdicke in Abhängigkeit der Lineatur und Flächendeckung. Eine Trennung nach der Ausrichtung erfolgt hier nicht, da die Messung an 10 Stellen über dem Substrat verteilt erfolgt und somit sowohl den orthogonalen als auch den parallelen Bereich abdeckt. Es ist ersichtlich, dass die Schichtdicken der Proben mit 80 und 40 L/cm im Bereich KW liegen, siehe Abschnitt 5.2.1.1, und somit für die Kennwerte als von der Schichtdicke unabhängig betrachtet werden können. Die Proben mit einer Lineatur von 140 L/cm entsprechen dem Bereich MO und können somit für die Mobilitätsbetrachtung als unabhängig angesehen werden.

Zunächst erfolgt die Analyse der *parallel zur Druckrichtung* ausgerichteten Transistoren in Abhängigkeit der Lineatur und als Funktion der Flächendeckung.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

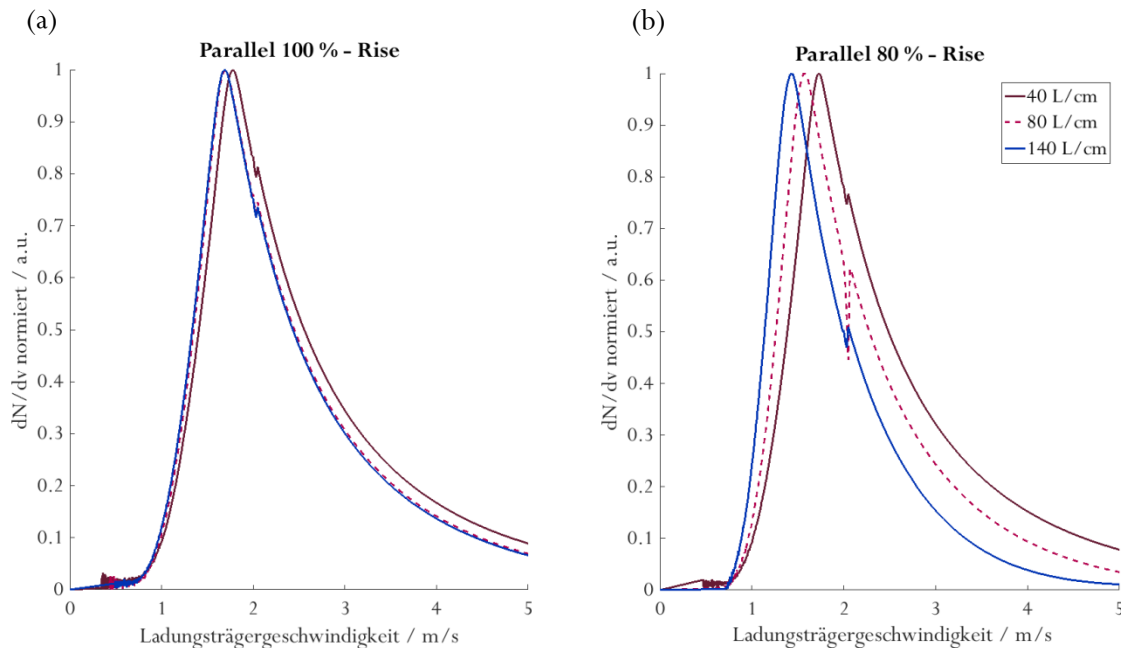


Abbildung 5.51: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung parallel ausgerichteter Transistoren als Funktion der Lineatur für den Halbleiter SP400³². Es ist die ansteigende Flanke *Rise* dargestellt für 100 % Flächendeckung (a) und 80 % Flächendeckung (b).

Die normierten *Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen* der ansteigenden Flanke für parallel ausgerichtete Transistoren des Halbleiters SP400 sind für Druckformen mit 100 % Flächendeckung in Abbildung 5.51 (a) und mit 80 % Flächendeckung in (b) dargestellt. Für 100 % Flächendeckung verlaufen die Verteilungen für die Proben mit einer Lineatur von 80 und die 140 L/cm fast deckungsgleich. Die Verteilung für eine Lineatur von 40 L/cm ist zu höheren Ladungsträgergeschwindigkeiten hin verschoben. Bei 80 % Flächendeckung sind alle drei Verteilungen dagegen klar gegeneinander verschoben. Interessanterweise fast um die gleiche Differenz der Ladungsträgergeschwindigkeit (Abszisse). Bei einer Lineatur von 140 L/cm treten die niedrigsten Ladungsträgergeschwindigkeiten auf, bei 40 L/cm die höchsten. Die extrahierten *Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum* $v_{Vert-max}$ bestätigen die an den Verteilungen beobachteten Trends, siehe Abbildung 5.52 (a). Für 80 % Flächendeckung ist die Abnahme des Maximums linear. Die Proben der Lineaturen 40 und 140 L/cm weichen signifikant von der gewählten Referenz 80 L/cm ab. Bei 100 % Flächendeckung weicht nur die

³² Proben Halbleiter SP400 Tiefdruck GT+W Superproofer, Transistoren parallel ausgerichtet : 0474 – Druckform pHL40-VF-100, 0478 – Druckform pHL40-VF-80, 0482 – Druckform pHL80-VF-100, 0486 – Druckform pHL80-VF-80, 0490 – Druckform pHL140-VF-100, 0494 – Druckform pHL140-VF-80, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Probe mit 40 L/cm signifikant ab. Die *Breite der Verteilung* B_{50} nimmt mit ansteigender Lineatur ab. Diese Abnahme ist für 100 % nicht signifikant, für 80 % jedoch. Das *Tailing* liegt für erstere zwischen 37 und 38 %, für letztere zwischen 37 und 40 %, siehe Abbildung A.11. Die Verteilungen weisen also alle ein Fronting auf, d. h. die Verteilungen sind zu höheren Geschwindigkeiten als der am Maximum herrschenden verformt.

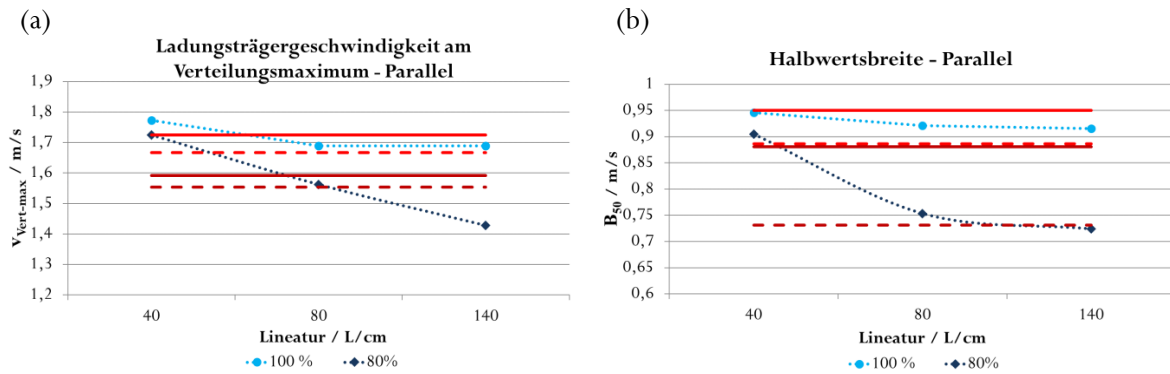


Abbildung 5.52: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ (a) sowie die Halbwertsbreite B_{50} (b) in Abhängigkeit der Lineatur und als Funktion der Flächendeckung für parallel ausgerichtete Transistoren des Halbleiters SP400³².

Auch für die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} und die *Geschwindigkeit bei Start der Verteilung* $v_{Vert-start}$ ergeben sich Abweichungen des gleichen Musters: Für die 100 % Fläche weichen 80 und 140 L/cm nicht signifikant voneinander ab, 40 L/cm dagegen schon und für die 80 % Fläche weichen alle Proben signifikant voneinander ab. Nach Beurteilung der Schichtdickenbereiche können die Unterschiede der 40 L/cm und 80 L/cm Proben nicht auf die Schichtdicke zurückgeführt werden. Sie resultieren somit aus dem Einfluss der Druckform. Abweichungen der 140 L/cm Probe könnten auch auf die Schichtdicke zurückzuführen sein. Die Differenz von 0,1 m/s bei der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ bei 80 % entspräche beispielsweise auch der Veränderung durch eine Schichtdickendifferenz von 20 nm, wie sie in der Spin-Coating-Versuchsreihe beobachtet wurde. Bei den 100 % Flächen hingegen schwindet ein Unterschied, der aufgrund der Schichtdicke erwartet werden würde. Nach dem zu Beginn des Absatzes erläuterten Schema nimmt also die *Anzahl der transportierten Ladungsträger* N_{LT} , Abbildung A.11 (a), mit ansteigender Lineatur ab und die *Geschwindigkeit bei Start der Verteilung*, Abbildung A.11 (b) zu.

Transitzeit

Die Transitzeit t_{tr} nimmt mit nach dem für die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} vorgestellten Schema zu. Der Gütefaktor α nimmt bei einer Flächendeckung von 80 % mit ansteigender Lineatur ab. Bei einer Flächendeckung von 100 % zeigt sich ein Schwanken um den Wert 0,75, siehe Abbildung 5.53 (b).

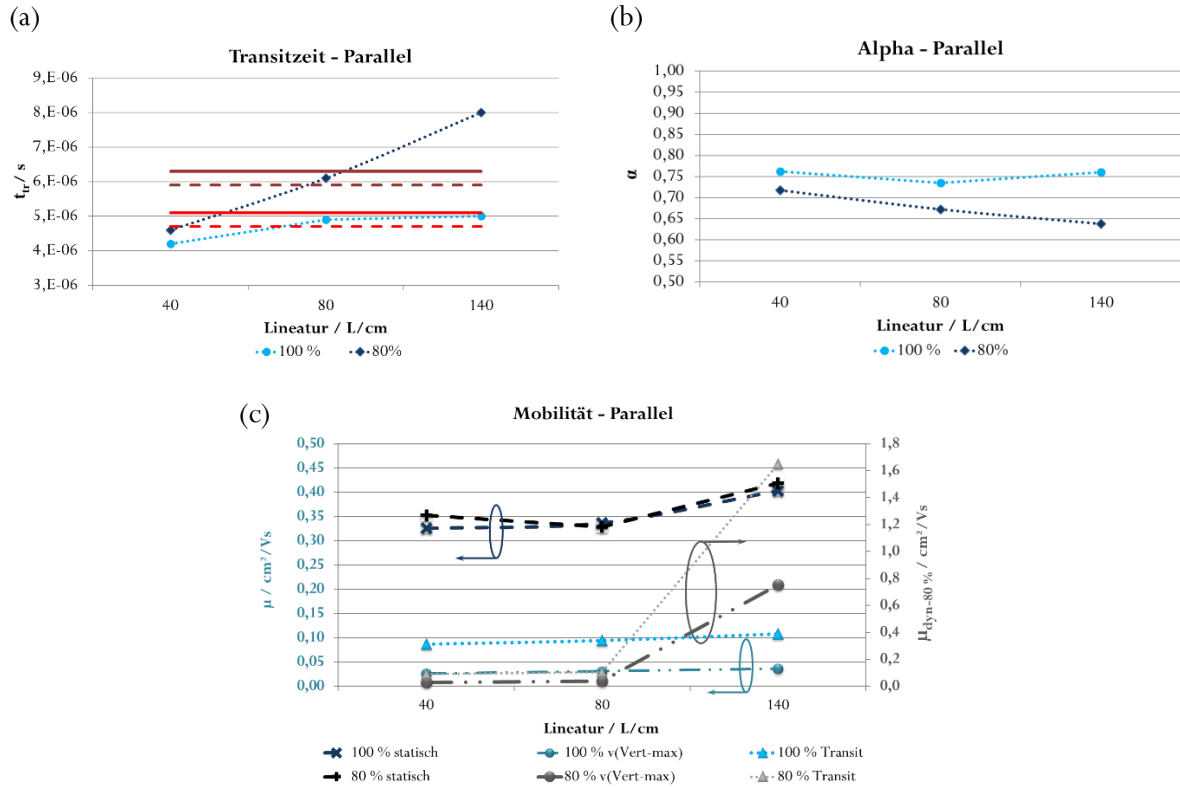


Abbildung 5.53: Transitzeit t_{tr} (a) sowie der Gütefaktor α (b) und die Mobilität μ (c) in Abhängigkeit der Lineatur und als Funktion der Flächendeckung für parallel ausgerichtete Transistoren des Halbleiters SP400³². Die Größtfehler der dynamischen Mobilitäten betragen zwischen 0,001 und 0,009 cm²/Vs und werden hier aufgrund der schlechten Sichtbarkeit hinter den Datenpunkten nicht dargestellt.

Mobilität

In Abbildung 5.53 (c) sind die *statischen* und *dynamischen Mobilitäten* dargestellt. Alle Mobilitäten nehmen mit ansteigender Lineatur zu. Bei den statischen Mobilitäten liegt ein Sprung zwischen der 80er und der 140er Lineatur vor. Dies kann auf die Schichtdicke zurückgeführt werden. Die dynamischen Mobilitäten der 100 % Fläche aus Transitzeit t_{tr} nehmen linear und von 40 auf 80 L/cm um 8 % und von 80 auf 140 L/cm um 14 % zu, die der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ um 20 % im ersten Schritt und um 17 % im zweiten. Die mit der Lineatur ansteigende Schwellspannung ist zu beachten, siehe Anhang A.1. Die der 80 % Fläche nimmt schon im ersten Schritt um 24 % für die

Mobilität aus Transitzeit und um 35 % für die Mobilität der häufigsten Ladungsträger zu. Der extrem hohe Wert für 140 L/cm ist hier auszuschließen. Er wird durch eine sehr hohe Schwellspannung von 9,8V hervorgerufen, wodurch der Nenner in Gleichung 3.5 fast null wird. Es ist noch einmal zu betonen, dass sich die Proben 40 und 80 L/cm für die Mobilität nicht im von der Schichtdicke unabhängigen Bereich befinden und die geringen Unterschiede somit auf die Schichtdicke zurückgeführt werden können.

Zusammenfassung

Die Analyse der Kennwerte und der Verteilung der ansteigenden Flanke ergibt, dass für parallel ausgerichtete Transistoren eine geringe Lineatur zur besseren Performance in Form der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$, der Transitzeit t_{tr} und des Gütefaktors α führt. Des Weiteren steigt mit abnehmender Flächendeckung der Unterschied zwischen Proben bis zum Überschreiten der Signifikanzgrenzen an. Für die Kennwerte der 100 % Flächen lassen sich die Proben 80 und 140 L/cm nicht unterscheiden, obwohl deren Schichtdickenprofil anderes vermuten lassen würde. Alle drei extrahierten Mobilitäten nehmen mit ansteigender Lineatur zu.

Die extrahierten Kennwerte für *Fall* bestätigen dies und sind in Tabelle A.12 aufgeführt. Einzige Ausnahmen sind, dass an der abfallenden Flanke die Verteilungsbreite B_{50} mit ansteigender Lineatur zunimmt und die Geschwindigkeit am Start der Verteilung abnimmt.

Im Folgenden werden die analogen Betrachtungen für *orthogonal ausgerichtete Transistoren* beschrieben. Von der orthogonalen Ausrichtung wird erhofft, dass sich zum einen die Schichtdickeninhomogenitäten im Schnitt herausmitteln, da nun verschiedenen Stellen der inhomogenen Schicht über dem Kanal liegen und zum anderen dass die Orientierung der Polymerrückgrate nun in Kanalrichtung, d. h. in Ladungstransportrichtung, verläuft, siehe Abbildung 5.42.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Abbildung 5.54 zeigt die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen für orthogonal ausgerichtete Transistoren. Wie auch bei den parallel ausgerichteten Transistoren verlaufen bei der 100 % Fläche die Verteilungen der 140 und 80 L/cm Probe annähernd deckungsgleich, während die Probe mit 40 L/cm zu höheren Geschwindigkeiten hin verschoben ist. Für die 80 % Fläche verschieben sich die Verteilungen mit abnehmender Lineatur zu höheren Geschwindigkeiten hin. Für die Kennwerte *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$, *Halbwertsbreite* B_{50} , *die Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} sowie die *Geschwindigkeit bei Start der Verteilung* ergeben sich die selben Beobachtungen und Werte wie für

parallel ausgerichtete Transistoren. Auf eine detaillierte Diskussion wird deshalb an dieser Stelle verzichtet. Die zugehörigen Kennwertdiagramme finden sich in Anhang A.2.

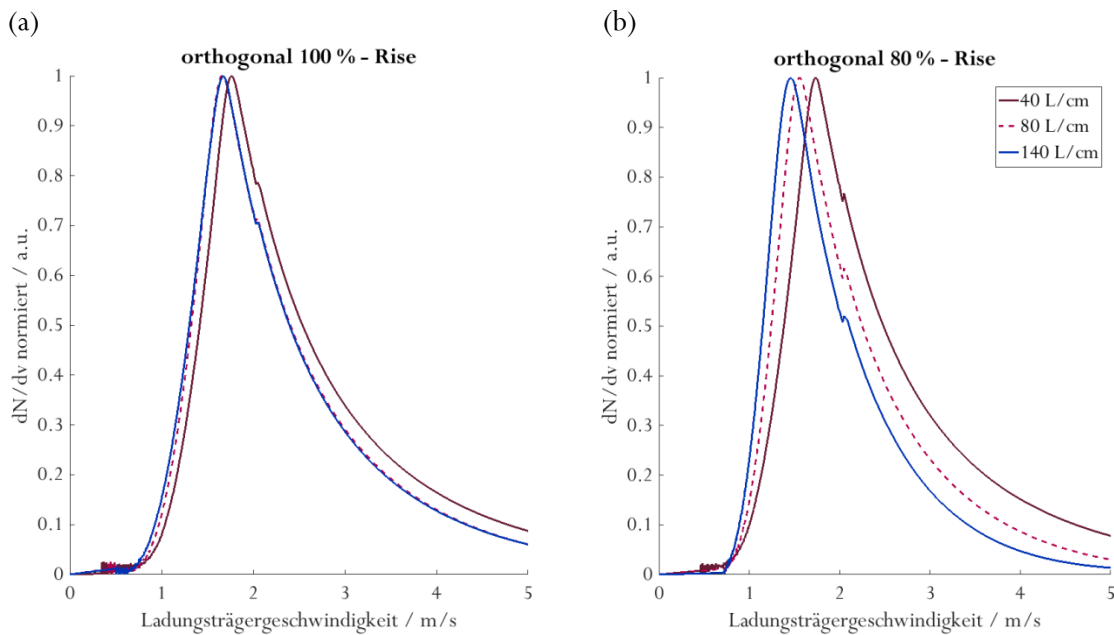


Abbildung 5.54: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung orthogonal ausgerichteter Transistoren als Funktion der Lineatur für den Halbleiter SP400³³. Es ist die ansteigende Flanke *Rise* dargestellt für 100 % Flächendeckung (a) und 80 % Flächendeckung (b).

Transitzeit

Bezüglich der Transitzeiten t_{tr} und des Gütefaktors α ergeben sich im Gegensatz zu den Kennwerten Unterschiede, die Abbildung 5.55 (a) dargestellt werden. Die *Transitzeit* t_{tr} ist für 100 % Flächendeckung stets, und für 80 % Flächendeckung mit Ausnahme von 140 L/cm, höher für orthogonal ausgerichtete Proben als für parallel ausgerichtete Proben. Anhand der Minimum- und Maximumtoleranzen für 80 L/cm-parallel ist sogar die Signifikanz der Abweichung über die Ausrichtung hinweg zu erkennen. Die niedrigsten Transitzeiten liegen bei einer Lineatur von 40 L/cm vor. Bei 100 % Flächendeckung betragen sie 4,2 und 4,3 μ s sowie bei 80 % 4,6 und 4,5 μ s für jeweils parallele und orthogonale Ausrichtung. Die Differenzen liegen an der Untergrenze der experimentellen Messauflösung und sind von daher unter Vorbehalt zu bewerten. Die Werte unterscheiden sich jeweils nur um 1 Messintervall. Mit zunehmender

³³ Proben Halbleiter Tiefdruck, Transistoren orthogonal ausgerichtet : 0475 – Druckform pHL40-VF-100, 0479 – Druckform pHL40-VF-80, 0483 – Druckform pHL80-VF-100, 0487 – Druckform pHL80-VF-80, 0491 – Druckform pHL140-VF-100, 0495 – Druckform pHL140-VF-80, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Lineatur nimmt die Differenz zwischen den Werten der 100 % Fläche und den Werten der 80 % Fläche zu. Der Gütefaktor α , siehe Abbildung 5.55 (b), weist für jede Lineatur ein anderes Verhalten auf: Für 40 L/cm liegt er bei 0,75 mit Ausnahme der niedriger gelegenen Proben 80 % parallel. Bei einer 80 % Fläche erreicht er den niedrigsten Wert von 0,64 für 80 % orthogonal und steigt an über 80 % parallel, 100 % orthogonal und 100 % parallel bis zu 0,73. Eine klare Trennung zwischen 80 % Flächen bei 0,64 und 100 % Flächen bei 0,76 ist schließlich bei 140 L/cm zu erkennen. Für die höchste Lineatur ist also ein klarer Unterschied zwischen den Flächendeckungen zu erkennen, jedoch kein Unterschied bezüglich der Ausrichtung.

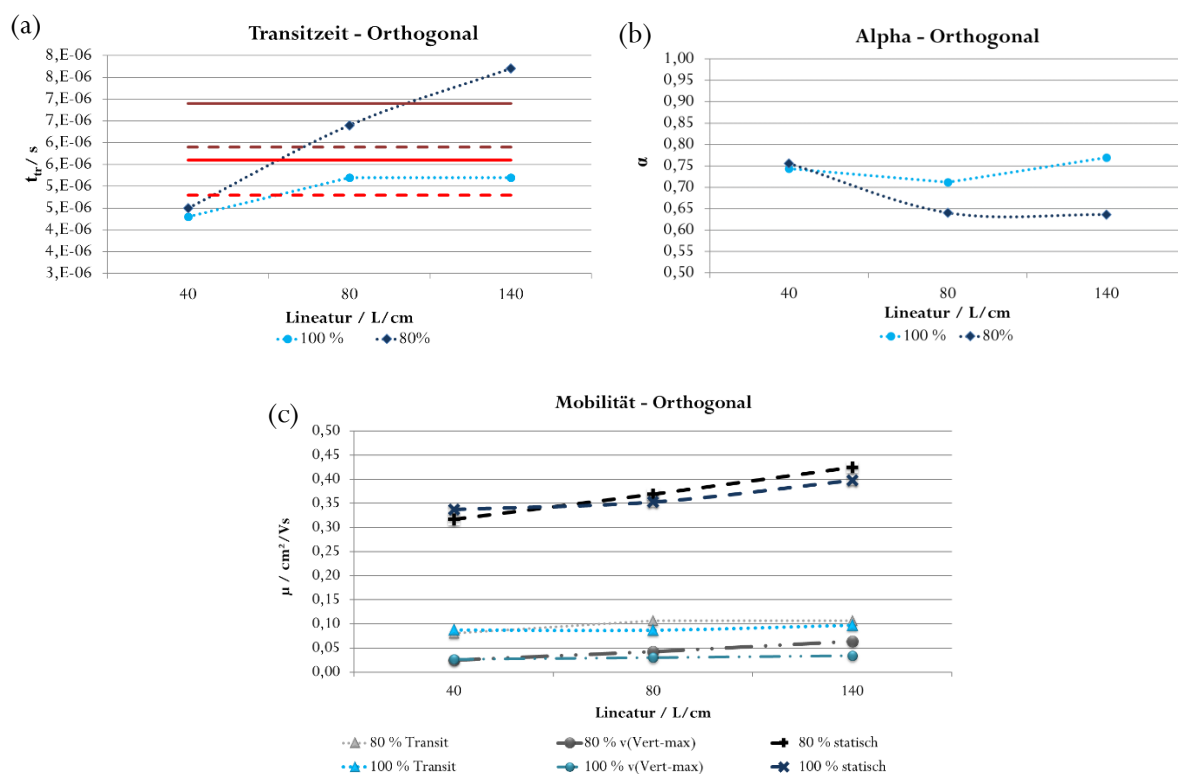


Abbildung 5.55: Transitzeit t_{tr} (a) sowie der Gütefaktor α (b) und die Mobilität μ (c) in Abhängigkeit der Lineatur und als Funktion der Flächendeckung für orthogonal ausgerichtete Transistoren des Halbleiters SP400³³.

Mobilität

Sowohl die *statische* als auch die *dynamische Mobilität* nehmen mit ansteigender Lineatur zu (10-15 % pro Schritt). Dabei liegt die Mobilität der 80 % Fläche für 80 und 140 L/cm stets über der Mobilität der 100 % Fläche. Bei 40 L/cm sind die Werte im dynamischen Fall gleich, im statischen ist die 80 % Mobilität leicht niedriger. Die höchste Mobilität liegt hier also für eine Lineatur von 140 L/cm bei 80 %

Flächendeckung vor. Tendenzen in den Kennwerten und in der Mobilität weichen auch hier voneinander ab. Es ist wieder zu beachten, dass die Mobilität auch in diesem Fall an eine hohe Schwellspannung gekoppelt zu sein scheint.

Auch bei orthogonal ausgerichteten Transistoren ergeben sich für die abfallende Flanke bis auf die Verteilungsbreite B_{50} und die Geschwindigkeit bei Start der Verteilung die gleichen Trends wie für die ansteigende Flanke. Die Trendtabelle ist Anhang A.3 Tabelle A.12 zu entnehmen.

Vergleich der Ausrichtungen

Bezüglich der Transitzeiten t_{tr} wurde beobachtet, dass die Differenz zwischen orthogonal und parallel ausgerichteten Transistoren mit ansteigender Lineatur zunimmt. Auf Basis dieser Feststellung wurden kreuzweise Differenzen gebildet: zum einen die Differenz zwischen parallel und orthogonal ausgerichteten Transistoren bei gleicher Flächendeckung und zum anderen die Differenzen zwischen 100 % und 80 % Flächendeckung bei gleichbleibender Transistorausrichtung. Für erstere ergibt sich weder in Abhängigkeit der Flächendeckung noch in Abhängigkeit der Lineatur eine Tendenz. Sowohl die Vorzeichen als auch die Größe der Differenzwerte erscheinen nahezu stochastisch verteilt zu sein. Die Kennwerte scheinen also in keiner direkten Abhängigkeit der Ausrichtung bei sonst gleichen Versuchsparametern zu stehen. Für die Differenzwerte der Flächendeckung in Abhängigkeit der Lineatur und als Funktion der Ausrichtung ergibt sich jedoch ein klares Bild:

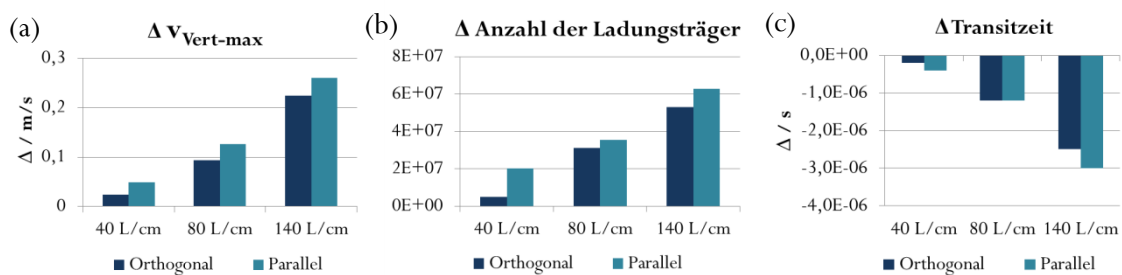


Abbildung 5.56: Differenzwerte bei 100 % und 80 % Flächendeckung für die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ (a), die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (b) und die Transitzeit t_{tr} (c) in Abhängigkeit der Lineatur und als Funktion der Ausrichtung des Transistors.

Aus Abbildung 5.56 ist erkennbar, dass mit ansteigender Lineatur die Differenz zwischen einer 100 % und einer 80 % Fläche zunimmt. Diese ist stets höher für parallel ausgerichtete Transistoren als für orthogonal ausgerichtete Transistoren. Der Einfluss der Flächendeckung auf das dynamische Verhalten ist somit am geringsten für niedrige Lineaturen und orthogonal ausgerichtete Transistoren. Bei Betrachtung

der Unterschiede zwischen der 40er und der 140er Lineatur, ist die Differenz für die 80 % Fläche und die parallele Ausrichtung stets höher als für die 100 % Fläche und die orthogonale Ausrichtung.

Zusammenfassung

Bezüglich der dynamischen Performance, gegeben durch die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$, durch die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} und durch die Transitzeit t_{tr} , von SP400-Transistoren mit 25 μm Kanallänge und 100 μm Elektrodenbreite kristallisiert sich somit klar ein Optimum bei Verwendung einer Druckform mit 40 L/cm und 100 % Flächendeckung bei orthogonaler Transistorausrichtung, d.h. einer parallelen Orientierung der Ladungstransportrichtung zur Druckrichtung, heraus. Dies steht im Widerspruch zu der Beobachtung, die sich auf Basis der statischen und der dynamischen Mobilität ergibt. Die Verteilungsbreite B_{50} sowie der Gütefaktor α bestätigen den Trend der Mobilität und zeigen für 140 L/cm mit 80 % Flächendeckung und orthogonaler Ausrichtung die besten Werte.

5.2.2.4 Einfluss der Druckformparameter und der Ausrichtung für den Halbleiter

PIF8-TAA

Eine zum vorangehenden Abschnitt 5.2.2.3 identische Analyse wurde für den Halbleiter PIF8-TAA durchgeführt. Bis auf die Halbwertsbreite B_{50} haben sich dieselben Trends und Abhängigkeiten der Kennwerte wie für den Halbleiter SP400 ergeben. Aus diesem Grund wird auf eine ausführliche Darstellung der Kennwertdiagramme an dieser Stelle verzichtet. Sie sind in Anhang A.2 Abbildung A.12 aufgeführt. Nachfolgend werden die zugehörigen Schichtdicken und Verteilungen vorgestellt sowie die Kennwerte vergleichend beschrieben.

Schichtdicke

Abbildung 5.57 zeigt die Schichtdicken d des Halbleiters PIF8-TAA in Abhängigkeit von der Gravur. In Abschnitt 5.2.1.2 konnte eine Unabhängigkeit des statischen und dynamischen Verhaltens von der Schichtdicke für alle Werte zwischen 40 und 85 nm festgestellt werden. Bezüglich dieser Reihe ergibt sich somit, dass die Proben der 140er Lineatur sowie die der 40 L/cm mit 100 % Flächendeckung nicht von der Schichtdicke unabhängig betrachtet werden können. Mögliche Abweichungen zu den anderen Proben könnten also auf die Schichtdicke zurückzuführen sein.

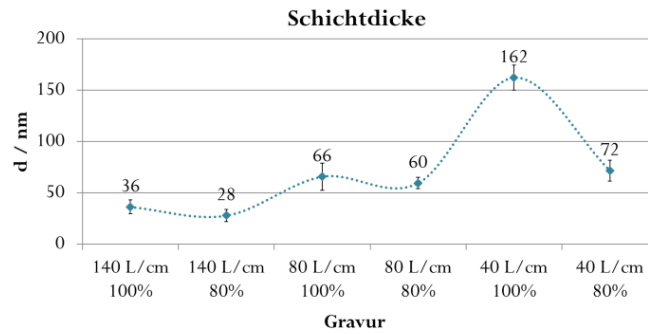


Abbildung 5.57: Schichtdicken d in Abhängigkeit der Gravur für den Halbleiter PIF8-TAA.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen und Kennwerte

In Abbildung 5.58 sind die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen als Funktion der Lineatur für parallel ausgerichtete Transistoren mit 100 % und 80 % Flächendeckung (a) und (b) und für orthogonal ausgerichtete Transistoren mit 100 % und 80 % Flächendeckung (c) und (d) dargestellt. Mit ansteigender Lineatur verschieben sich die Verteilungen zu niedrigeren Geschwindigkeiten hin. Die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{Vert-max}$ verschiebt sich für 100 % Flächendeckung für beide Ausrichtungen um ca. 0,6 m/s, die der 80 % Flächendeckung um ca. 0,3 m/s. Des Weiteren nimmt die *Breite der Verteilung* B_{50} mit ansteigender Lineatur stark ab. Dieser Effekt ist deutlicher für 80 % Flächendeckung (ca. 0,8 m/s) als für 100 % Flächendeckung (ca. 0,3 m/s). Für das *Tailing* wurden Werte zwischen 45 und 49 % ermittelt (letztere bei den orthogonalen Verteilungen). Die Verteilungen sind somit annähernd symmetrisch verteilt. Die *Anzahl der Ladungsträger* N_{IT} nimmt mit ansteigender Lineatur um bis zu $3 \cdot 10^7$ ab, dabei stärker für die 80 % Flächendeckung als für 100 %.

Transitzeit

Auch die *Transitzeiten* t_{tr} steigen für größer werdende Lineaturen von 40 zu 140 L/cm an, siehe Abbildung A.12. Die Werte bei 100 % Flächendeckung steigen annähernd linear um 4,4 μ s (orthogonal), die bei 80 % Flächendeckung verlaufen sie im ersten Schritt annähernd parallel zur 100 % Kurve und steigen um 3,2 μ s. Allerdings steigen sie im zweiten Schritt um 18,3 μ s. Das identische Verhalten – von einer leichten Verschiebung der Absolutwerte abgesehen – zeigt sich für parallel ausgerichtete Proben. Der *Gütefaktor* α liegt für Proben mit 40 L/cm unabhängig von der Ausrichtung oder Flächendeckung zwischen 0,87 und 0,90. Von dort aus fällt er mit ansteigender Lineatur für 100 % Flächendeckung um ca. 0,15 und für 80 % Flächendeckung um ca. 0,3 für orthogonale und sogar 0,4 bei paralleler

Ausrichtung. Auch hier ist der Schritt zwischen 80 und 140 L/cm wesentlich größer als der zwischen 40 und 80 L/cm.

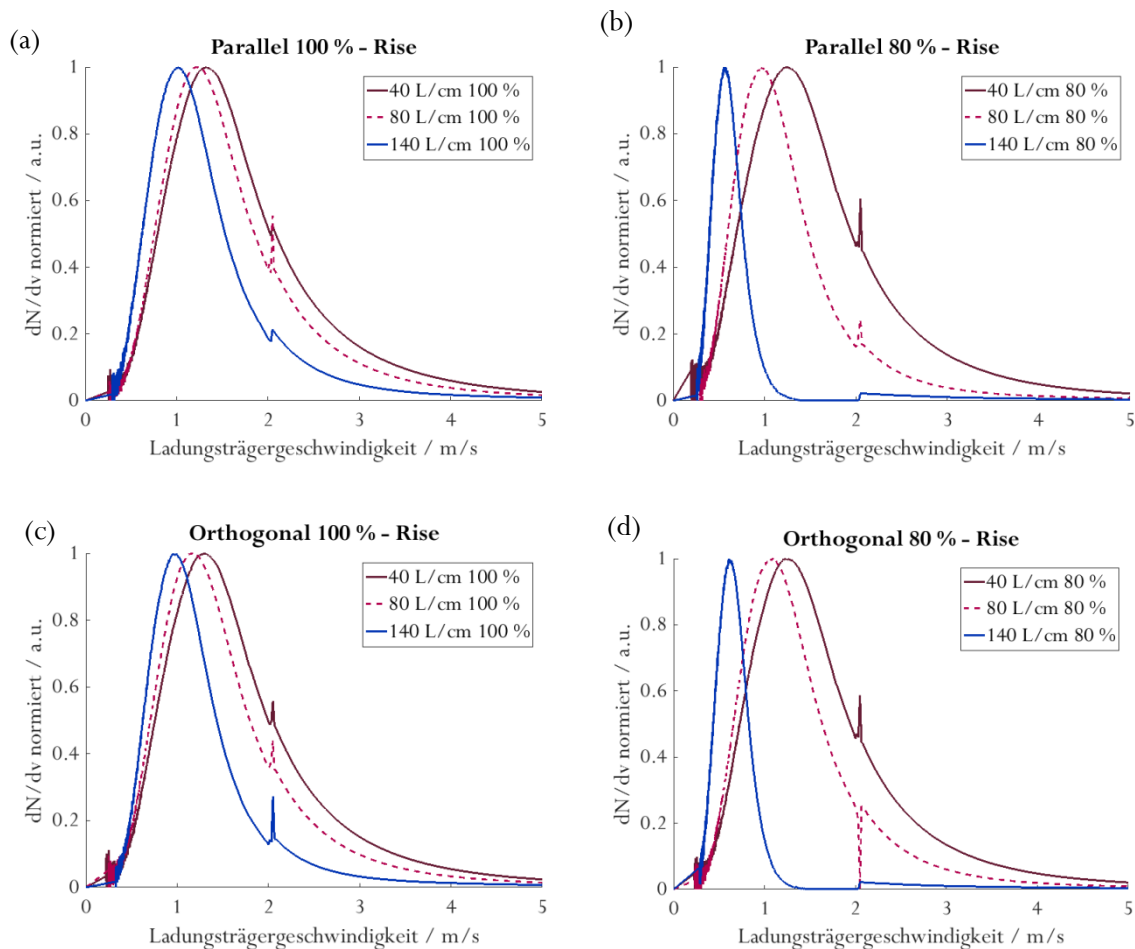


Abbildung 5.58: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen des Halbleiters PIF8-TAA³⁴ als Funktion der Lineatur für folgende Gravuren: parallel 100 % Flächendeckung (a), parallel 80 % Flächendeckung (b), orthogonal 100 % Flächendeckung (c) und orthogonal 80 % Flächendeckung (d).

Mobilität

Die in Abbildung 5.59 gezeigte *statische Mobilität* bleibt für parallel ausgerichtete Transistoren mit 80 % Flächendeckung für alle Lineaturen konstant (0,021 cm²/Vs) und schwankt für 100 % Flächendeckung zwischen 0,020 und 0,024 cm²/Vs. Es ist anzumerken, dass die Abweichungen größer sind als die

³⁴ Proben Halbleiter Tiefdruck GT+W Superproofer, Transistoren parallel ausgerichtet : 0472 – Druckform pHL40-VF-100, 0476 – Druckform pHL40-VF-80, 0480 – Druckform pHL80-VF-100, 0484 – Druckform pHL80-VF-80, 0488 – Druckform pHL140-VF-100, 0492 – Druckform pHL140-VF-80; Transistoren orthogonal ausgerichtet : 0473 – Druckform pHL40-VF-100, 0477 – Druckform pHL40-VF-80, 0481 – Druckform pHL80-VF-100, 0485 – Druckform pHL80-VF-80, 0489 – Druckform pHL140-VF-100, 0493 – Druckform pHL140-VF-80, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

ermittelte Standardabweichung des Mittelwerts. Diese ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Für orthogonal ausgerichtete Transistoren schwanken alle statisch ermittelten Werte um $0,021 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ im gleichen Maße. Die Probe mit 40 L/cm weist stets die niedrigste statische Mobilität auf. Eine um bis zu 8% höhere Mobilität kann für die 140 L/cm Proben auf die Schichtdicke zurückgeführt werden. Die *dynamischen Mobilitäten* hingegen fallen mit ansteigender Lineatur ab. Generell liegen die Mobilitäten bei 100% Flächendeckung über denen bei 80% Flächendeckung und fallen auch weniger stark ab (Beispiel Parallel Transitzeit: Schritt1 - 13% (100%) und 33% (80%) sowie Schritt2 - 26% (100%) und 55% (80%)). Die dynamischen Mobilitäten sind um Faktor 2-3 größer als die statischen Mobilitäten. Die aus statischer Messung ermittelten Schwellspannungen fließen zwar nicht in die Berechnung mit ein, seien in diesem Rahmen aber beschrieben: Sie nehmen mit ansteigender Lineatur in allen Fällen zu. Für 80% Flächendeckung stärker als für 100% . Von besonderer Wichtigkeit ist an dieser Stelle, dass für die Proben 140 L/cm 80% parallel und orthogonal die Schwellspannung mehr als zehn Volt beträgt (parallel $13,2 \text{ V}$ und orthogonal $12,9 \text{ V}$), d. h. die dynamische Messung hat in diesem Fall im Sättigungsbereich der Drainstroms stattgefunden. Es kann nicht mehr von einem homogenen elektrischen Feld im Kanal ausgegangen werden.

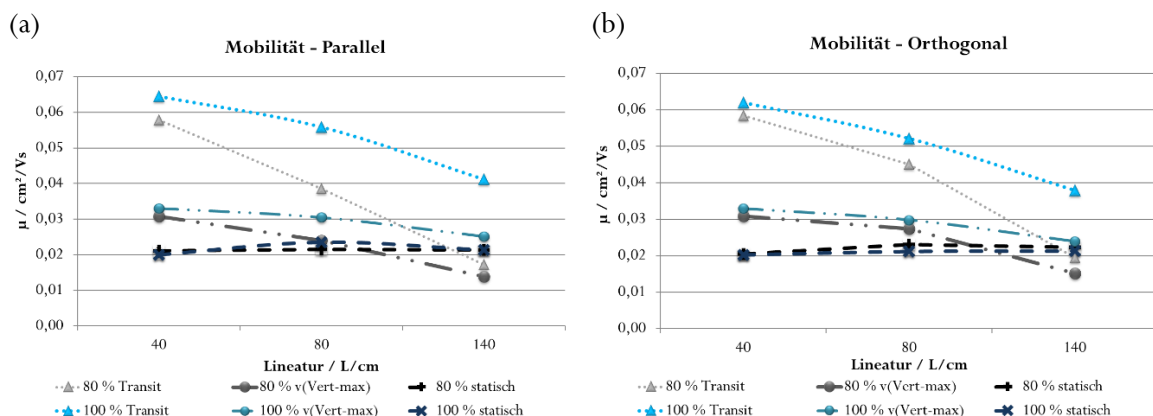


Abbildung 5.59: Statische und dynamische Mobilität μ in Abhängigkeit der Lineatur für parallel ausgerichtete Transistoren (a) und orthogonal ausgerichtete Transistoren (b) des Halbleiters PIF8-TAA³⁴.

Zusammenfassung

Im Vergleich zum Halbleiter SP400 ist zunächst zu erwähnen, dass alle Abweichungen der Kennwerte für den Halbleiter PIF8-TAA als Funktion der Lineatur signifikant zur Referenz bei 80 L/cm sind. Dies war für 100% Flächendeckung bei SP400 nicht der Fall. Des Weiteren sind die Differenzen der Werte für den Halbleiter PIF8-TAA stets größer als die für den Halbleiter SP400. So ändert sich beispielsweise die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ um $0,6 \text{ m/s}$ für den Halbleiter PIF8-TAA

gegenüber zu 0,3 m/s für den Halbleiter SP400. Die Transitzeit t_{tr} weist ein Delta von 20 μ s anstelle von 4 μ s auf. Unterschiede im dynamischen Verhalten sind also an PIF8-TAA-Transistoren und die für ihn gewählten Messparameter deutlicher ausgeprägt.

Bezüglich der Differenzwerte zwischen 100 % und 80 % Flächendeckung wird das Bild aus der SP400-Versuchsreihe bestätigt: Mit ansteigender Lineatur nimmt der Unterschied zwischen Kennwerten der 100 % Fläche und der 80 % Fläche zu. Dabei ist das Delta für parallel ausgerichtete Transistoren stets größer als für orthogonal ausgerichtete Transistoren. Des Weiteren ist der Unterschied zwischen der 40er und der 140er Lineatur stets größer für 80 % als für 100 % Flächen und auch hier für parallel größer als für orthogonal. Auch für den Halbleiter PIF8-TAA enthält die zu bevorzugende Druckform eine Lineatur von 40 L/cm und eine Flächendeckung von 100 % bei orthogonaler Ausrichtung der Transistoren.

5.2.2.5 Einfluss des Flexodrucks für den Halbleiter PIF8-TAA

Der Flexodruck ist ein alternatives Verfahren zu dem in den bisherigen Untersuchungen zur Prüfung dieser Hypothese verwendeten Tiefdruck. Der Bereich der Viskosität und Oberflächenspannung der Fluide, der mit dem Flexodruck zuverlässig verarbeitet werden kann, schließt den des Tiefdrucks ein. Abbildung 5.60 (a) zeigt zwei orthogonal ausgerichtete Proben des Halbleiters PIF8-TAA aus dem Flexodruck und dem Tiefdruck im Vergleich (Tiefdruck: Probe 0481 mit 66 ± 13 nm; Flexodruck: Probe 0501 mit 54 ± 13 nm). Beide Proben besitzen also eine ähnliche Schichtdicke und liegen in dem in Abschnitt 5.2.1.2 definierten Plateaubereich der Kennwerte. Die Verteilung ist für den Tiefdruck zu höheren Geschwindigkeiten hin verschoben. Es existieren somit Unterschiede zwischen den beiden Verfahren, die sich auf die Halbleiterschicht auswirken. Bezüglich der Schichtbildung unterscheidet sich der Flexodruck vom Tiefdruck durch die zweifache Farbspaltung, durch das verwendete Druckformmaterial, durch die Druckprozessparameter Geschwindigkeit und Druck sowie durch die Tatsache, dass das Fluid hier nicht aus vertieften Chromnäpfchen sondern von einer Polymerdruckform, siehe Abbildung 5.60 (b) übertragen wird.

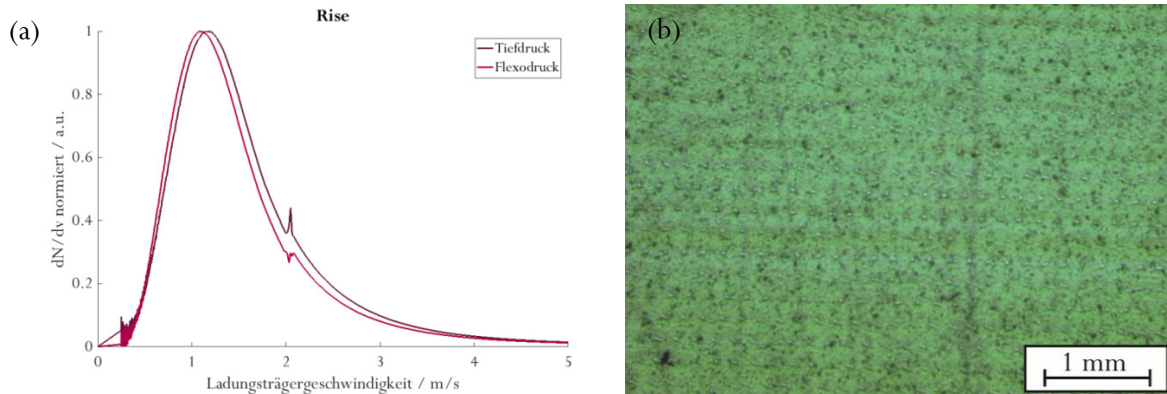


Abbildung 5.60: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung des Halbleiters PIF8-TAA im Tiefdruck³⁵ ($d = 66 \pm 13$ nm) und im Flexodruck³⁵ ($d = 54 \pm 13$ nm) (a) und Mikroskopaufnahme (LEICA DM4000M, 2,5-fach vergrößert) der Oberfläche eines Nyloflex ACE-Klischees (b).

Im Flexodruck werden, im Gegensatz zum Tiefdruck, polymere Materialien für die Druckformen verwendet. Diese sind meist instabil gegenüber den in der gedruckten Elektronik eingesetzten Lösemitteln, siehe Abschnitt 2.2.2 und 2.3.5. Für die in dieser Arbeit verwendete Kombination von Mesitylen, PIF8-TAA und dem Photopolymer Nyloflex ACE ist aus der Zusammenarbeit mit *Trollmann* (2014) bekannt, dass sich Bestandteile der Druckform während des Druckens aus dem Klischee herauslösen und sich in der Halbleiterschicht niederschlagen. Der Einfluss dieser Verunreinigungen und des Flexodruckverfahrens an sich auf das statische und dynamische Verhalten organischer Feldeffekttransistoren wird im Folgenden vorgestellt. In diesem Abschnitt werden somit zunächst die reinen Einflüsse des Klischeematerials untersucht, bevor anschließend die Ergebnisse aus dem Flexodruck vorgestellt werden.

Für die Untersuchung des reinen Materialeinflusses wurden ca. 1,12 g Klischee-Material für sieben Tage in ca. 20 mL Mesitylen eingelegt. Das Herauslösen von Bestandteilen der Druckform ist mit dem bloßen Auge zu erkennen, da sich das Lösemittel dem Klischee entsprechend grünlich verfärbt. Aus diesem „verunreinigten“ Lösemittel wurde im Anschluss ein zwei prozentiger Ansatz des Halbleiters PIF8-TAA angefertigt. Dieser wird im Folgenden als „mit Klischee“ bezeichnet. Die Beschichtung erfolgte einmal im Spin-Coating und einmal im Tiefdruck.

³⁵ Proben Halbleiter Tiefdruck GT+W Superproofer: 0481 – Druckform pHL80-VF-100 Transistoren orthogonal ausgerichtet, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.

Proben Halbleiter Flexodruck IGT-F1: 0501 – Rasterwalze 12 mL/m² Transistoren orthogonal ausgerichtet, siehe Abschnitt 4.6.1; Dielektrikum D320#B nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte sowie Transitzeit

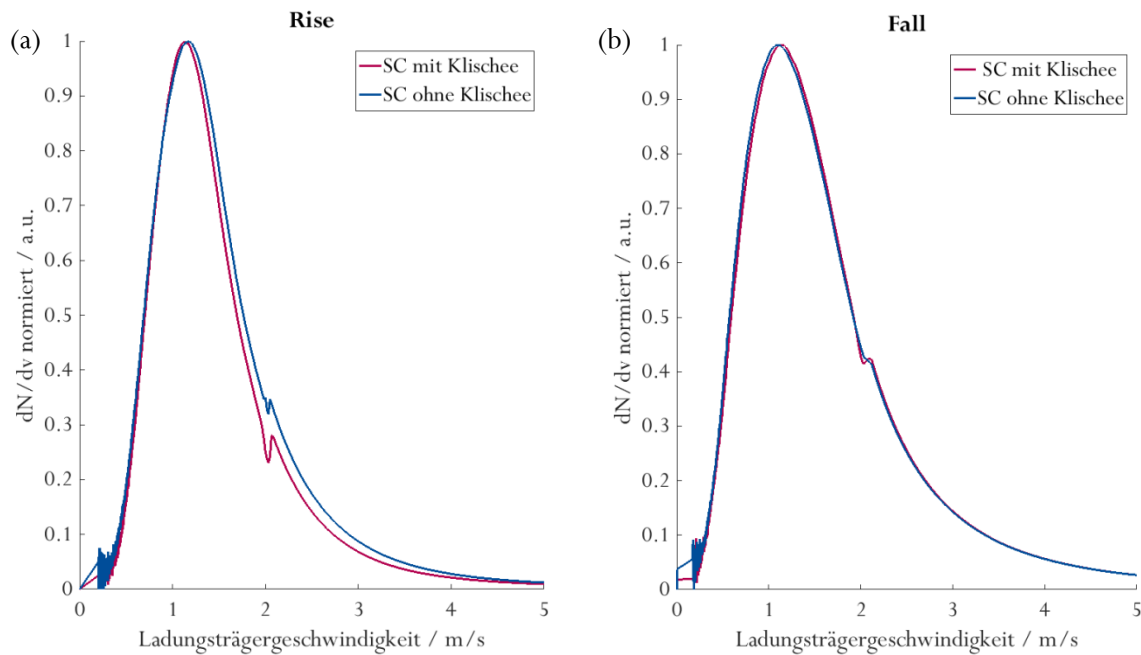


Abbildung 5.61: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen für identisch im Spin-Coating hergestellte Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA³⁶ aus Lösung mit (Probe 0504) und ohne Verunreinigungen durch das Klischee (Probe 0505) für *Rise* (a) und *Fall* (b).

Abbildung 5.61 zeigt die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen für im Spin-Coating hergestellte Proben des Halbleiters PIF8-TAA mit (Probe 0504) und ohne Verunreinigungen durch das Klischee (Probe 0505) für die ansteigende Flanke *Rise* (a) und die abfallende Flanke *Fall* (b). An der ansteigenden Flanke *Rise* sind Abweichungen der Verteilung im Fronting-Bereich zu erkennen. Die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ weicht für die ansteigende Flanke nicht ab, für die Abfallende ist die der Probe mit Klischee um 0,05 m/s höher, siehe Abbildung A.15 (a). Für *Rise* ergibt sich, dass die Verteilung mit Klischee signifikant schmaler ist, als die Verteilung der Probe ohne Klischee. Für *Fall* weicht hingegen die Verteilungsbreite B_{50} nicht signifikant voneinander ab, siehe Abbildung A.15 (b). Das Verhalten unterscheidet sich somit für die ansteigende und die abfallende Flanke. Die extrahierten Parameter *Form der Verteilung* (in beiden Fällen 48 % Tailinganteil), *Anzahl der Ladungsträger* N_{IT} (2,9 zu $3,2 \cdot 10^7$ für Klischee-haltigen und freien Halbleiter) und *Transitzeit* t_a (12,9 zu 12,4 μs für Klischee-haltigen und freien Halbleiter) weichen nicht signifikant voneinander ab. Der

³⁶ Proben Halbleiter PIF8-TAA Spin-Coating: 0504 – 4500 rpm mit Verunreinigungen, 0505 – 4500 rpm ohne Verunreinigungen, siehe auch Abschnitt 4.5; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Gütefaktor α liegt für die Probe ohne Klischee bei 0,86 und für die Probe mit Klischee niedriger bei 0,81, siehe Abbildung A.15 (c). Dies stimmt mit der Erwartung einer schlechteren Performance von klischeehaltigen Proben überein.

Mobilität

Für sowohl die *statische* als auch für beide *dynamisch* ermittelten *Mobilitäten* liegt der Wert der Probe ohne Klischee höher als der der Probe mit Klischee, siehe Abbildung 5.62 (a). Das Vorhandensein von Verunreinigungen aus dem Klischee setzt also die Mobilität des Halbleiters herab. Auch die Schwellspannung ist ohne Klischee ($2,6 \pm 0$ V) niedriger als mit Klischee ($5,6 \pm 0,7$ V). Die Verunreinigungen bilden vermutlich Fallenzustände, durch die der Ladungstransport beeinflusst wird. Liegen die energetischen Zustände der Verunreinigung in ähnlichen Bereichen wie die des Halbleiters, so können diese selbst Fallenzustände bilden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass die Verunreinigungen die Filmbildung lokal beeinflussen, z.B. durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, und es so zur Bildung von Fallenzuständen kommt.

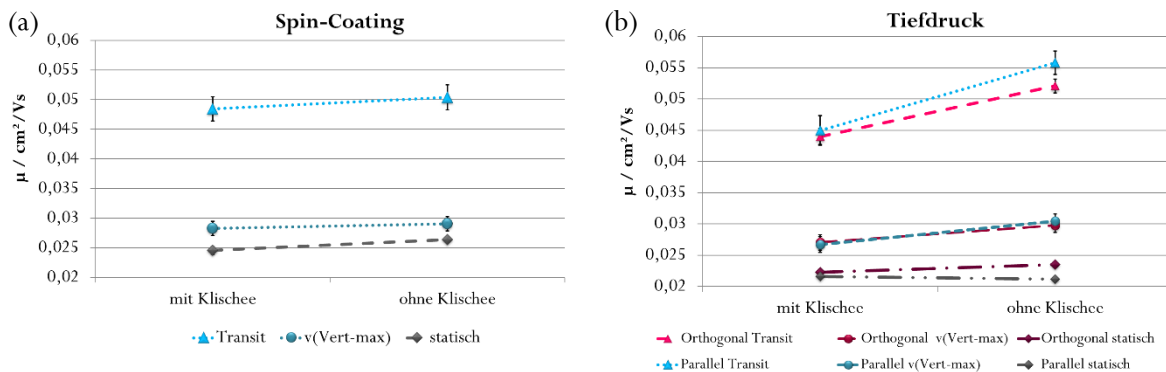


Abbildung 5.62: Statische und dynamische Mobilität ermittelt aus der Transitzeit und der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{vert-max}}$ für im Spin-Coating erzeugte Proben³⁶ (a) und im Tiefdruck erzeugte Proben³⁷ (b) mit und ohne Klischee. Bei letzteren sind die Transistoren einmal parallel zur Druckrichtung und einmal orthogonal zur Druckrichtung angeordnet. Die Fehlerbalken der aus statischen Messungen ermittelten Mobilität ist hinter den Datenpunkten nicht zu erkennen.

Um die Bedingungen im Flexodruck noch besser nachstellen zu können, wurden beide Halbleiteransätze im Tiefdruck prozessiert. Hierfür wurde ein Tiefdruckzylinder mit einer Lineatur von 80 L/cm und einer Flächendeckung von 100 % eingesetzt. Pro Abdruck wurde ein Substrat so ausgerichtet, dass die Transistoren senkrecht zur Druckrichtung (Proben: 0506 mit Klischee, 0481 ohne Klischee) lagen und ein Substrat so, dass die Transistoren parallel zur Druckrichtung (Proben: 0507 mit Klischee, 0480 ohne

Klischee) lagen. Die Ergebnisse unterscheiden sich lediglich in den Absolutwerten, jedoch nicht in den Trends, die sie aufweisen. Im Folgenden werden deshalb die Ergebnisse exemplarisch anhand der parallel ausgerichteten Transistoren vorgestellt. Die Erläuterung des Einflusses der Ausrichtung wurde bereits in Abschnitt 5.2.2.3 diskutiert. Aufgrund der identischen Herstellung wird von einer identischen Schichtdicke ausgegangen. Es ist anzumerken, dass die Proben mit und ohne Klischee nicht am gleichen Tag hergestellt werden konnten und deshalb zusätzlich eine Überprüfung der Abweichungen anhand der in Abschnitt 5.1.5.1 ermittelten Grenzwerte erfolgen musste.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

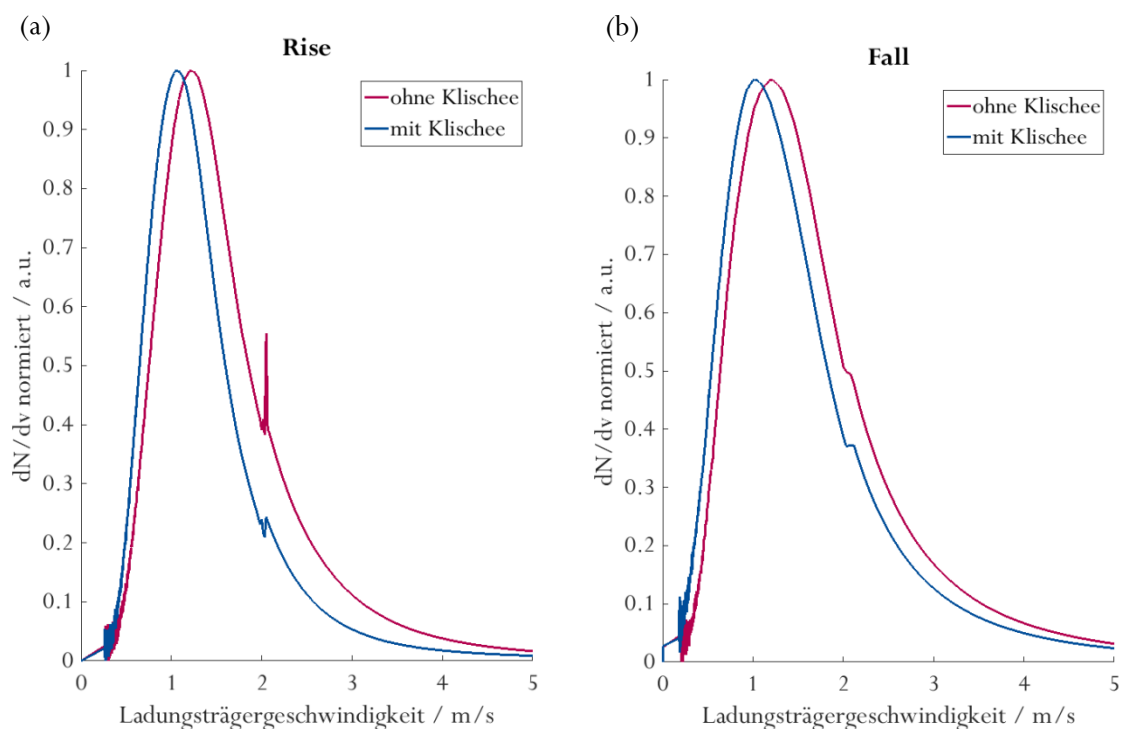


Abbildung 5.63: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung von im Tiefdruck hergestellten und orthogonal ausgerichteten Proben mit und ohne Verunreinigungen aus dem Klischee³⁷ für die ansteigende Flanke *Rise* (a) und die abfallende Flanke *Fall* (b).

Abbildung 5.63 zeigt die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen von im Tiefdruck hergestellten Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA mit und ohne Verunreinigungen aus dem Klischee der ansteigenden und abfallenden Flanke. In beiden Fällen ist die Verteilung für die Probe ohne Klischee

³⁷Proben Halbleiter PIF8-TAA Tiefdruck GT+W Superproofer: 0481 – Druckform pHL80-VF-100 ohne Verunreinigung – Transistoren orthogonal ausgerichtet, 0506 – Druckform pHL80-VF-100 mit Verunreinigung – Transistoren orthogonal ausgerichtet, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

hin zu höheren Geschwindigkeiten verschoben. Die Proben, die Klischeerückstände im Lösemittel enthalten, erzielen stets die schlechteren Kennwerte: Die *Geschwindigkeit der häufigsten Ladungsträger* ist mit Klischee an *Rise* um 0,15 m/s geringer, siehe Abbildung 5.64 (a). Die *Halbwertsbreite* B_{50} in (b) ist ohne Klischee stets höher. Für *Rise* liegt sie um 0,12 m/s, für *Fall* um 0,1 m/s höher. Es können aus klischeehaltigem Halbleiter $5,6 \cdot 10^6$ *Ladungsträger* weniger detektiert werden (c).

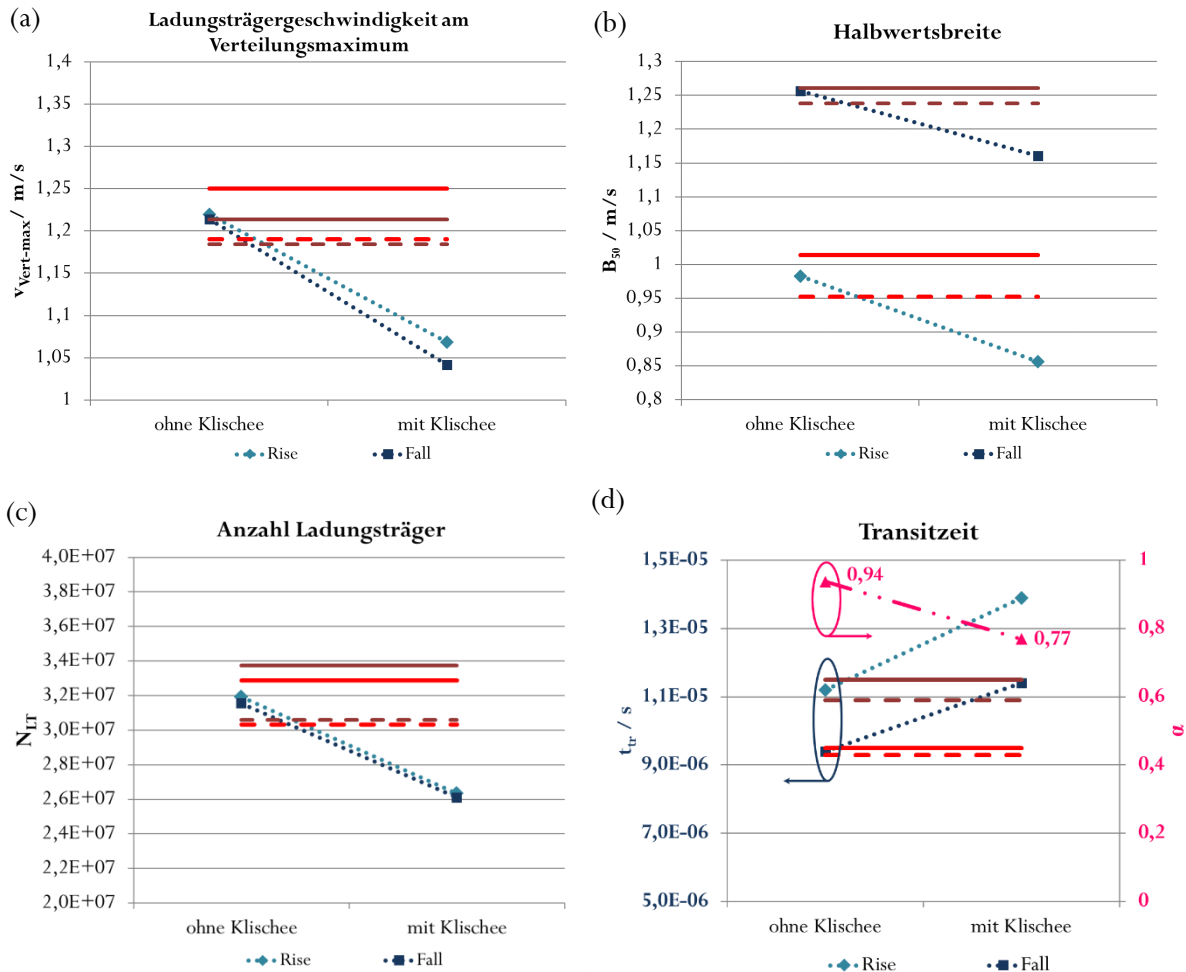


Abbildung 5.64: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ (a), Verteilungsbreite B_{50} (b), Anzahl der Ladungsträger N_{LT} für *Rise* (c) sowie Transitzeit t_{tr} (d) für im Tiefdruck erzeugte Proben mit und ohne Verunreinigungen aus dem Klischee³⁷.

Transitzeit

Des Weiteren ist die *Transitzeit* t_{tr} für *Rise* um 2,7 μ s und für *Fall* um 0,2 μ s größer. Der *Gütefaktor* α beträgt 0,94 ohne Klischee und 0,77 mit Klischee, siehe Abbildung 5.64 (d).

Da die Proben an verschiedenen Versuchstagen im Abstand von 6 Tagen hergestellt wurden, wurde die Signifikanz der Abweichungen zusätzlich anhand der prozentualen Abweichungen überprüft, die für Versuche an verschiedenen Tagen festgestellt wurden, siehe Abschnitt 5.1.5.1. Bis auf das *Tailing* an beiden Flanken und die *Halbwertsbreite* B_{50} der abfallenden Flanke sind alle Abweichungen größer als die auf den Versuchstag zurückführbaren. Alle weiteren Kennwerttrends sind in Tabelle A.11 dargestellt.

Mobilität und Zusammenfassung

Abbildung 5.62 (b) zeigt die *statische und dynamische Mobilität* für die Proben mit paralleler und orthogonaler Ausrichtung zur Druckrichtung. Ohne Klischee sind die Mobilitäten - bis auf Orthogonalstatisch - stets höher als mit Klischee. Des Weiteren sind sie auch höher als die der Proben im Spin-Coating (a). Die Mobilitäten der Proben mit Klischee sind niedriger als die des Spin-Coatings.

Auch die im Tiefdruck hergestellten Proben bestätigen: Die Performance von mit Klischeematerial verunreinigten Proben ist schlechter als für reine Proben.

Um auf die anfänglichen Verteilungen in Abbildung 5.60 zurückzukommen, stellt sich nun die Frage, ob die Einflüsse rein auf den Verunreinigungen aus dem Klischee beruhen, oder ob das Verfahren an sich noch wesentlich dazu beiträgt.

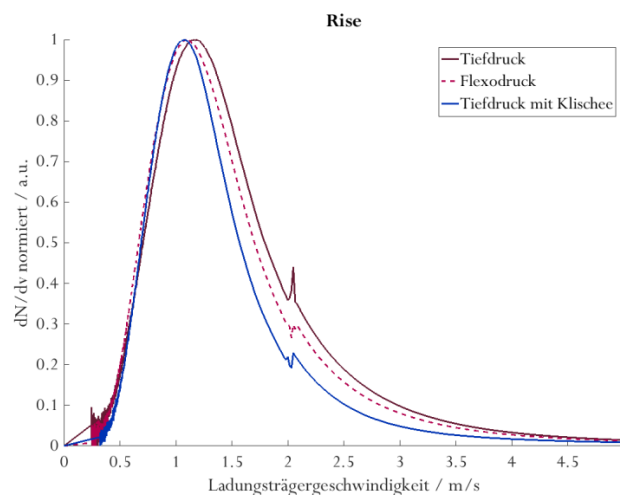


Abbildung 5.65: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen des Halbleiters PIF8-TAA³⁸ prozessiert aus dem Tiefdruck, dem Flexodruck und dem Tiefdruck mit von Klischee verunreinigtem Fluid für die ansteigende Flanke im Vergleich.

³⁸ Proben Halbleiter PIF8-TAA Tiefdruck GT+W Superproofer: 0481 – Druckform pHL80-VF-100 ohne Verunreinigung – Transistoren orthogonal ausgerichtet, 0506 – Druckform pHL80-VF-100 mit Verunreinigung – Transistoren orthogonal ausgerichtet, siehe Abschnitt 4.6.2; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.

Hierfür wurden die Verteilungen aus Abbildung 5.60 mit der Verteilung der zugehörigen orthogonal ausgerichteten und mit Klischee verunreinigten Probe aus dem Tiefdruck verglichen, siehe Abbildung 5.65. Im Vergleich zum Tiefdruck sind die beiden Verteilungen hin zu langsameren Geschwindigkeiten verschoben. Die beiden klischeeenthaltenden Proben stimmen zwar am Verteilungsmaximum überein, unterscheiden sich für *Rise* aber in allen anderen Parametern. Es wird somit postuliert, dass auch das Flexodruckverfahren an sich durch die spezifischen Prozessbedingungen einen Einfluss auf das dynamische Verhalten hat. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden untersucht:

Im Flexodruck selbst spielt die Rasterwalze eine entscheidende Rolle. Sie fungiert als Vordosiereinheit und erfüllt die Aufgabe immer die gleiche Menge an Fluid für den Druck zur Verfügung zu stellen. Jedoch besitzt auch die Rasterwalze eine eigene Nöpfchenstruktur, die der Aufnahme und Übertragung des Fluids dient. Der Einfluss dieser wird nun in Bezug auf das dynamische Verhalten an parallel ausgerichteten Transistoren untersucht. Hierfür wurden Transistoren mit drei³⁹ verschiedenen Schöpfvolumen verwendet: 10 mL/m² (120 L/cm; Probe 0500), 12 mL/m² (180 L/cm; Probe 0498) und 24 mL/m² (90 L/cm; Probe 0502), siehe auch Tabelle 4.5. Die angegebenen Schöpfvolumen wurden mit einer Anicam der Fa. Troyka anhand von 10 Messpunkten auf der Rasterwalze ermittelt. Es ist anzumerken, dass diese nicht mit den Angaben des Herstellers und den sich logisch aus der Lineatur ergebenden Werten übereinstimmen. Das Schöpfvolumen beeinflusst vor allem die auf das Substrat übertragene Fluidmenge und somit die Schichtdicke. Die ermittelten Schichtdickenwerte (24 mL/m²: 44 ± 6 nm; 12 mL/m²: 50 ± 3 nm; 10 mL/m²: 54 ± 4 nm) liegen im in Abschnitt 5.2.1.2 ermittelten Plateau-Bereich. Ein Vergleich ist somit gerechtfertigt. Warum die Schichtdicken antiproportional zum Schöpfvolumen steigen, konnte nicht geklärt werden.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen der ansteigenden (a) und abfallenden Flanke (b) sind vergleichend für die drei verwendeten Rasterwalzen in Abbildung 5.66 dargestellt. Mit zunehmendem Schöpfvolumen ist die Verteilung bei *Rise* hin zu niedrigeren

Halbleiter PIF8-TAA Flexodruck IGT-F1: 0501 – Rasterwalze 12 mL/m² Transistoren orthogonal ausgerichtet, siehe Abschnitt 4.6.1; Dielektrikum D320#B: nach Referenzprozess Abschnitt 4.5.
Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

³⁹ Ursprünglich wurden vier Rasterwalzen verwendet. Die vierte wies ein Schöpfvolumen von 6 mL/m² auf. Die Messdaten zu dieser Reihe wurden aber aufgrund des sehr hohen Rauschens und der somit schlechten Extraktionsgüte der Kennwerte für diesen Vergleich verworfen. Die Verteilung war zu niedrigeren Geschwindigkeiten hin verschoben.

Ladungsträgergeschwindigkeiten verschoben, siehe Abbildung 5.67 (a). Für *Fall* weichen die Verteilungen in Abbildung 5.66 (b) kaum erkennbar aber dennoch am *Verteilungsmaximum* $v_{\text{Vert-max}}$ signifikant voneinander ab. Auch hier nimmt die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum mit zunehmendem Schöpfvolumen ab.

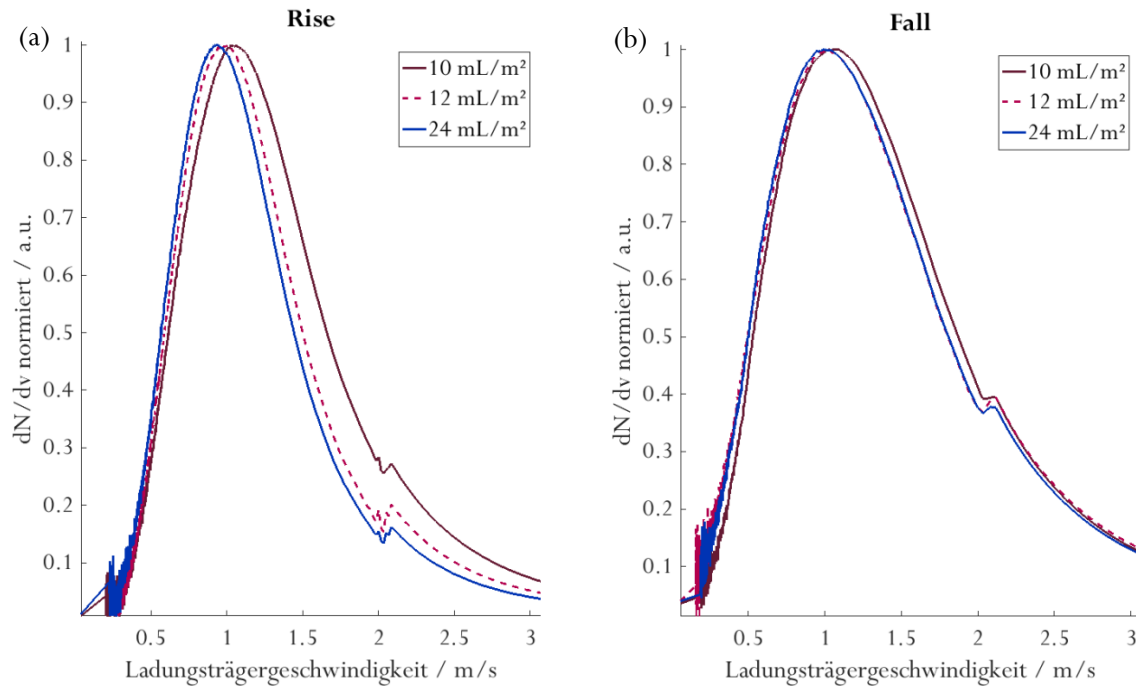


Abbildung 5.66: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung für im Flexodruck hergestellte und parallel ausgerichtete PIF8-TAA-Transistoren⁴⁰ unter Verwendung verschiedener Schöpfvolumina S_{p} . Die Verteilungen der ansteigenden Flanke *Rise* (a) und die abfallenden Flanke *Fall* (b) unterscheiden sich deutlich in ihrer Breite.

Die *Halbwertsbreite* B_{50} (b) ist für *Fall* im Allgemeinen höher als für *Rise*. Ebenfalls ist sie für 10 mL/m² in beiden Fällen am höchsten. Der Sprung von 10 auf 12 mL/m² ist erstaunlicherweise größer als von 12 auf 24 mL/m². Dies wird für alle Kennwerte beobachtet. Unterschiede in der Breite zeigen sich für *Rise* deutlicher als für *Fall*. Die *Anzahl der detektierten Ladungsträger* N_{LT} , siehe Abbildung 5.67 (c) weist ein Minimum für das Schöpfvolumen 12 mL/m² auf. Hierfür gibt es nach aktuellem Wissensstand keine Erklärung. Die Werte der Ladungsträgerzahl sind für *Rise* und *Fall* nach wie vor identisch.

⁴⁰ Proben Halbleiter PIF8-TAA Flexodruck IGT-F1: 0498 – Rasterwalze 8 mL/m² Transistoren parallel ausgerichtet, 0500 – Rasterwalze 12 mL/m² Transistoren parallel ausgerichtet, 0502 – Rasterwalze 16 mL/m² Transistoren parallel ausgerichtet, siehe Abschnitt 4.6.1; Dielektrikum D320#B nach Referenzprozess Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

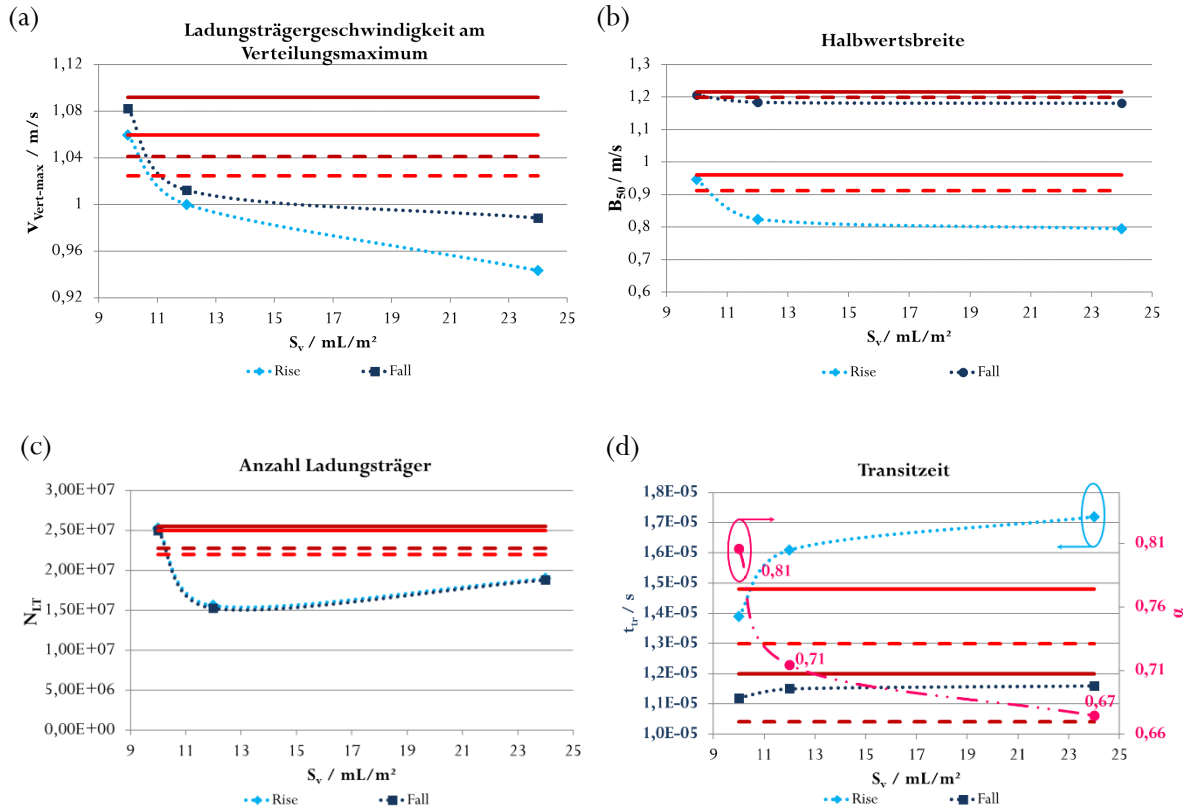


Abbildung 5.67: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (c) sowie Transitzeit t_{tr} und Gütefaktor α (d) in Abhängigkeit des Schöpfvolumens⁴⁰ für *Rise* und *Fall*. Die Toleranzgrenzen beziehen sich auf *Rise*.

Transitzeit

Die Transitzeiten t_{tr} sind für die Probe mit 10 mL/m^2 Schöpfvolumen am geringsten und nehmen mit zunehmendem Schöpfvolumen zu, siehe Abbildung 5.67 (d). Für die genannte Probe ist auch der Gütefaktor α am höchsten. Dieser nimmt um 0,14 über alle drei Proben ab. Je höher das Schöpfvolumen der Rasterwalze, desto inhomogener wird die Halbleiterschicht und desto schlechter wird die Performance.

Mobilität

Diese Verschlechterung in der Performance mit zunehmendem Schöpfvolumen zeigt sich allerdings nicht in der statischen Mobilität. Diese liegt für 10 mL/m^2 am niedrigsten und steigt leicht für 12 und 24 mL/m^2 um $0,001 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ auf den gleichen Wert von $0,021$ an. Die dynamischen Mobilitäten verhalten sich wie das Reziproke der Transitzeit bzw. sind proportional zur Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{vert-max}}$.

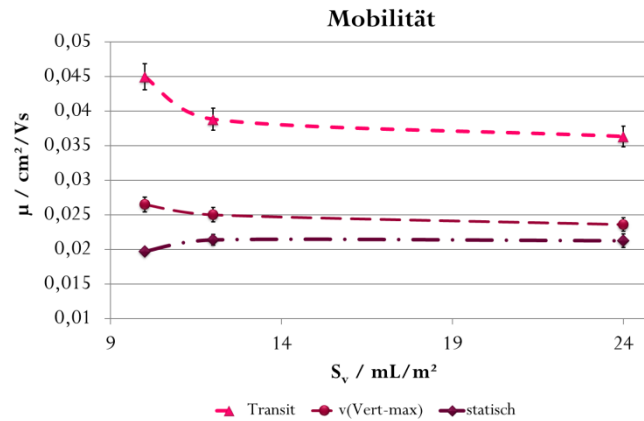


Abbildung 5.68: Statische und dynamische Mobilität μ (ermittelt aus Transitzeit und der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$) des im Flexodruck prozessierten Halbleiters PIF8-TAA⁴⁰ in Abhängigkeit des Schöpfvolumens S_v .

Zusammenfassung

Im Flexodruck an sich hat die Rasterwalze also entscheidenden Einfluss auf das dynamische Verhalten des Transistors. Analog zum grafischen Druck gilt hier: Je feiner die Rasterwalze, desto höher die Güte des Druckprodukts.

5.2.2.6 Beurteilung der Hypothesen

In diesem Abschnitt wurden die Einflüsse der Druckgeschwindigkeit, der Druckformparameter und der Ausrichtung anhand von Hypothese 2 sowie die Einflüsse des Flexodrucks anhand von Hypothese 3 untersucht.

Hypothese 2:

Statische und optische Charakterisierungsmethoden reichen aus, um einen Druckprozess anhand der Druckgeschwindigkeit und der Druckformparameter zu optimieren. Die erhaltenen Prozessfenster lassen sich auf das dynamische Verhalten übertragen, d.h. die statische Charakterisierung reicht aus, um Transistoren für Schaltungen auszuwählen.

Zur Untersuchung des Einflusses der Druckgeschwindigkeit wurden für beide Halbleiter jeweils die Geschwindigkeiten 1 bis 5 m/s untersucht sowie eine Abstufung um Faktor 10, welche im Falle des Halbleiters PIF8-TAA 0,03 – 0,3 – 3 m/s und im Falle des Halbleiters SP400 0,05 – 0,5 – 5 m/s

betragen hat. Für den Halbleiter PIF8-TAA wurden sowohl für die Kennwerte als auch für die Mobilitäten für die beiden Geschwindigkeitsabstufungen verschiedene Trends beobachtet, siehe Tabelle 5.17. Für einen Anstieg um Faktor 10 steigen die scheinbaren Geschwindigkeiten der Ladungsträger an, für einen Anstieg zwischen 1 und 5 m/s weichen die Werte nicht mehr signifikant voneinander ab. Es liegt ein Plateau vor. Für die Transitzeit t_{tr} , den Gütefaktor α und die dynamische Mobilität kristallisieren sich die Proben mit 2 und 3 m/s als Optimum heraus. Beim Vergleich mit der optischen Güte der Schichten, siehe Abbildung 5.44, wird eine zunehmende Homogenität mit ansteigender Druckgeschwindigkeit beobachtet. Dies erklärt den Anstieg der Geschwindigkeiten bei einer Erhöhung der Druckgeschwindigkeit um Faktor 10. Ebenfalls wurde darauf beruhend, ein Optimum in der Performance für die homogenste Schicht bei 5 m/s erwartet. Dies ist nicht eingetreten. Die inhomogeneren Druckbilder der Geschwindigkeiten 2 und 3 m/s zeigen die beste Performance. Die optische Güte und die elektrische Güte stehen in diesem Fall nur für starke Änderungen wie das Schließen der Schicht im Zusammenhang. Unter der Voraussetzung, dass die Schicht bereits geschlossen ist, schlägt sich ein abnehmender Grad der Inhomogenitäten nicht zwingend in der Performance nieder.

Für den Halbleiter SP400 konnten keine klaren Trends der Kennwerte und Mobilitäten von der Druckgeschwindigkeit festgestellt werden, siehe Tabelle 5.17. Die Werte schwanken für alle Parameter um jeweils einen Wert. Die niedrigsten Transitzeiten und höchsten Gütefaktoren existieren für 2 und 5 m/s. Für die Mobilität zeigen sich Plateaubereich für die statische zwischen 0,5 und 3 m/s sowie bei 4 und 5 m/s und für die dynamische zwischen 2 und 5 m/s.

Tabelle 5.17: Trendtabelle für die beiden Halbleiter PIF8-TAA und SP400 für die Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit an der ansteigenden Flanke Rise.

Parameter	PIF8-TAA		SP400	
	0,03 - 3 m/s	1 - 5 m/s	0,05 - 5 m/s	1 - 5 m/s
$V_{Vert-max}$	↗	→	(↗)	○
Verteilungsbreite bei 50 % B50	↗	→	(↗)	(→)
Tailing bei 50 %	↘	○	○	○
Anzahl der Ladungsträger	↗	→	(↗)	(↗)
Transitzeit t_{tr}	↘	Optimum	○	○
Gütefaktor α	↗	Optimum	(↗)	○
μ (statisch)	↗	→	○	(→)
μ (dynamisch)	↗	Optimum	(↘)	(→)

Im Rahmen der Untersuchung der Druckformparameter wurden drei Druckformen mit Lineaturen von 40, 80 und 140 L/cm mit jeweils 100 % und 80 % Flächendeckung verwendet. Es ergibt sich für beide

Halbleiter, dass für orthogonal ausgerichtete Transistoren mit ansteigender Lineatur die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ abnimmt, und dass die Verteilungsbreite B_{50} , die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} sowie der Gütefaktor α mit Ausnahme von SP400-100 % ebenfalls abnehmen und die Transitzeiten t_{tr} zunehmen, siehe Tabelle 5.18.

Tabelle 5.18: Trends der Kennwerte für eine ansteigende Lineatur für orthogonal ausgerichtete Transistoren der beiden Halbleiter SP400 und PIF8-TAA.

Parameter	SP400		PIF8-TAA	
	100%	80%	100%	80%
$v_{\text{Vert-max}}$	↘	↘	↘	↘
Verteilungsbreite bei 50 % B_{50}	↗	↘	↘	↘
Tailing bei 50 %	↗	○	↘	○
Anzahl der Ladungsträger	(↗)	↘	↘	↘
Transitzeit t_{tr}	(↗)	↗	↗	↗
Gütefaktor α	(↗)	(↘)	↘	↘
$\mu(\text{statisch})$	↗	↗	→	→
$\mu(\text{dynamisch})$	↗	↗	↘	↘

Die Mobilität steigt für Transistoren des Halbleiters SP400 in allen Fällen an, für den Halbleiter PIF8-TAA bleibt die statische Mobilität für alle Lineaturen gleich und nimmt für die dynamische Mobilität ab. Niedrige Lineaturen sind somit zu bevorzugen. Das sich hier aus statischer Messung für PIF8-TAA ergebende Prozessfenster umfasst alle drei Lineaturen. Im dynamischen Verhalten zeigen sich jedoch erhebliche Unterschiede.

Anhand des Vergleichs der Absolutwerte stellen sich Flächendeckungen von 100 % als besser heraus als 80 % Flächendeckungen. Dieser Unterschied ist am geringsten für niedrige Lineaturen, d. h. hohe Schichtdicken, und orthogonal ausgerichtete Transistoren. Aus 100 % Flächen entstehen homogenere Schichten, da die abgesetzten Näpfchen näher beieinander liegen und die Levelingzeit aufgrund der niedrigeren Wellenlänge verkürzt ist. Dass für orthogonal ausgerichtete Transistoren stets kleinere Differenzwerte beim Vergleich der Kennwerte beobachtet werden, wird wie folgt gedeutet: Durch das Ausrichten der Transistoren orthogonal zur Druckrichtung liegen die Transistorkanäle und somit die Ladungstransportrichtung in Druckrichtung. Die gegebene Inhomogenitäten verlaufen somit parallel zum Kanal. Würde man den Transistor entlang seiner Weite in Abschnitte unterteilen, die sehr viel kürzer der Wellenlänge der Inhomogenität sind, so hätte jeder Transistorkanal eine positionsabhängige Halbleiterschicht mit gegebener Dicke, die über die Länge des Kanals konstant ist. Die gemessenen und extrahierten Werte ergeben sich als Mittel dieser Kanalabschnitte. Sind die

Transistoren parallel ausgerichtet, sodass die Kanäle senkrecht zur Druckrichtung ausgerichtet sind, kann es dazu kommen, dass die Halbleiterschicht in ihrer Dicke entlang der Kanalabschnitte schwankt. Dies führt offenbar zu höheren Schwankungen in den elektrischen Eigenschaften. Da es sich bei beiden Halbleitern um amorphe Halbleiter handelt, siehe Abschnitt 4.2.2, ist eine Anisotropie der elektrischen Eigenschaften nicht bekannt. Eine gegebene Vorzugsrichtung der Polymoleküle aufgrund der Scherung im Druckprozess bleibt hier also außer Acht.

Im Allgemeinen ist keine direkte Abhängigkeit der Kennwerte von der Ausrichtung zu erkennen. Sie zeigt lediglich Unterschiede zwischen anderen Parametern, wie der Flächendeckung, stärker oder schwächer auf. Zusammenfassend gesagt, ergeben niedrige Lineaturen bei 100 % Flächendeckung und orthogonaler Ausrichtung der Transistoren die besten Performances.

Zusammenfassend ist zu sagen: Die optische Güte einer Halbleiterschicht reicht – mit Ausnahme großer Defekte in der Schicht – nicht aus, um einen Prozess bezüglich der Transistorperformance zu optimieren. Dies wurde anhand der Variation der Druckgeschwindigkeit für den Halbleiter PIF8-TAA gezeigt. Die aus statischer Messung erhaltenen Prozessfenster stimmen nicht immer mit den aus dynamischer Sicht ermittelten überein. Für den Halbleiter PIF8-TAA weicht das Verhalten der Mobilitäten in Abhängigkeit der Lineatur ab, in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit zeigt sich jedoch eine dem dynamischen Verhalten ähnliche Tendenz. Der Vergleich für den Halbleiter SP400 gestaltet sich stellenweise als schwierig, da die dynamische Mobilität sehr häufig von der hohen Schwellspannung dominiert wird. Dennoch zeigt sich auch hier, dass die im statischen Verhalten beobachteten Optima, wie z.B. eine hohe Mobilität für 140 L/cm, sich im dynamischen Verhalten, z.B. der Transitzeit t_{tr} , die am niedrigsten ist für 40 L/cm, nicht widerspiegeln. Prozessfenster und Optima aus statischen Messungen lassen sich also nicht konsequent auf das dynamische Verhalten übertragen.

Hypothese 2 wird verworfen.

Als Alternative zum Tiefdruck wurde der Flexodruck untersucht. Im Flexodruck entstehen zwei Nachteile, die durch das Verfahren bedingt sind: zum einen können sich Bestandteile der Druckform während des Druckens aus der Form herauslösen und in der Halbleiterschicht niederschlagen und zum anderen kann es zu einer erhöhten Inhomogenität der Schichten kommen, da die Druckformen im verwendeten Lösemittel quellen und das Druckbild somit beeinflusst werden kann. Inhomogenitäten können durch die Wahl der Rasterwalze beeinflusst werden, da diese – analog zum Tiefdruckzylinder – Nöpfchen enthält, die dem Nassfilm eine „Vorstruktur“ geben. Dies wurde anhand folgender Hypothese überprüft:

Hypothese 3

Der Flexodruck – unter Verwendung des Klischeematerials Nyloflex ACE – ist – in Kombination mit PIF8-TAA gelöst in Mesitylen – zur Erzeugung organischer Halbleiterschichten ungeeignet. Das Quellen der Druckform sowie die durch diesen Lösemittelkontakt gelösten organische Verunreinigungen aus dem Klischee beeinflussen die Performance des Transistors.

Der Einfluss der Verunreinigungen wurde anhand von Spin-Coating und anhand von vorab mit Klischee verunreinigten Tiefdruck-Proben untersucht. Es zeigt sich einheitlich eine bessere Performance für Proben, die kein Klischee enthalten, siehe Tabelle 5.19. Das Klischeematerial Nyloflex ACE beeinflusst also die Performance des Halbleiters PIF8-TAA. Im Flexodruck an sich, weisen Rasterwalzen niedrigen Schöpfvolumens die besten Performances auf. Niedrige Schöpfvolumen basieren im Allgemeinen auf hohen Lineaturen, welche wiederum eine „Vorstruktur“ niedriger Wellenlänge hinterlassen. In dieser Versuchsreihe, stimmt dies leider nicht überein. Die Rasterwalze mit 12 mL/m² besitzt die höchste Lineatur und entspricht laut Herstellerangaben auch einem Schöpfvolumen von nur 8 mL/m². Dennoch konnte gezeigt werden, dass die Transistorperformance mit kleiner werdendem Schöpfvolumen zunimmt.

Hypothese 3 wird somit angenommen.

Tabelle 5.19: Trendtabelle für Transistoren mit und ohne Verunreinigungen aus dem Klischee im Halbleiter sowie für die Erhöhung des Schöpfvolumens im Flexodruck. Die mit * markierte statische Mobilität weicht vom Verhalten parallel ausgerichteter und im Spin-Coating erzeugter Proben ab: für diese ist die statische Mobilität ohne Klischee höher.

Parameter	TD orthogonal	Schöpfvolumen
	ohne zu mit Klischee	ansteigend
$V_{\text{Vert-max}}$	↘	↘
Verteilungsbreite bei 50 % B50	↘	↘
Tailing bei 50 %	↗	○
Anzahl der Ladungsträger	↘	○
Transitzeit t_{tr}	↗	↗
Gütefaktor α	↘	↘
$\mu(\text{statisch})$	↗*	↗
$\mu(\text{dynamisch})$	↘	↘

5.2.3 Einfluss der dielektrischen Schicht

Im Rahmen dieser Arbeit wurde, wie in Abschnitt 4.2.3 vorgestellt, das polymere Dielektrikum lisicon® D320 verwendet. Für die Prozessierung mittels Druckverfahren standen zunächst zwei Kriterien im Vordergrund der Untersuchungen: zum einen die bereits erwähnte hohe Durchschlagsfestigkeit und zum anderen eine hohe Homogenität der Schichtdicke, um an jeder Stelle im Transistor ein einheitlich homogenes elektrisches Feld zu bewirken. Bei gegebenem ϵ_r resultieren hohe Durchschlagsfestigkeiten aus hohen Schichtdicken. Um dies zu erreichen, werden bei Verwendung von Polymeren hohe Feststoffgehalte in den Lösungen eingesetzt. Hierdurch steigt die Viskosität der Fluide erheblich. Zusätzlich wird die Schichtdicke durch das Verwenden von Druckformen mit hohen Übertragungsvolumen, d. h. meist eine niedrige Lineatur, erhöht. Aus dieser Kombination wird von vorne herein ein für das Leveln ungünstiger Zustand geschaffen: Der Nassfilm weist Inhomogenitäten hoher Wellenlänge aus einem Fluid hoher Viskosität auf. Die Wellenlänge geht mit der vierten Potenz, die Viskosität mit der ersten in die Leveling-Zeit ein, siehe Gleichung 2.9 in Abschnitt 2.3.1.2. Positiv wirkt sich nur die hohe Schichtdicke aus, da sie mit der dritten Potenz im Nenner steht.

Eine weitere Option die Schichtdicke zu erhöhen, ist der mehrschichtige Druck. Abbildung 5.69 (a) zeigt die Schichtdicke in Abhängigkeit der Anzahl an gedruckten Schichten für eine Druckform mit 40 L/cm^{41} . Sowohl die mittlere Schichtdicke als auch die Standardabweichung der 10 gemessenen Werte je Probe nehmen mit ansteigender Schichtanzahl zu. Die Inhomogenitäten nehmen also drastisch zu. Ein Profilschnitt der dreischichtigen Probe ist in (b) dargestellt. Die Amplitude dieser sehr periodischen Schwankung beträgt bis zu 100 nm.

An der Probe in Abbildung 5.69 (b) ist eine reine Messung der Erhöhungen und Vertiefungen auf der Oberfläche, d. h. ohne Bezug zum Glassubstrat, gelungen. Obwohl die Inhomogenitäten eine hohe Periodizität aufweisen, korreliert die Wellenlänge der Störung nicht mit der Lineatur. Die Wellenlänge ist doppelt so groß (ca. $500 \mu\text{m}$) wie der Näpfchenabstand ($250 \mu\text{m}$). Abbildung 5.69 (c) hingegen zeigt einen sehr viel typischeren Verlauf mit sehr unregelmäßigeren Schichtdickenschwankung. Bei ca. 2,5 mm Distanz zum Startpunkt liegt eine Fehlstelle vor. Bei 0 nm Oberflächenhöhe befindet der Messkopf sich auf dem Glasboden der Proben.

⁴¹ Die Inhomogenitäten dieser Proben waren so groß, dass mit der üblichen Vorgehensweise nicht alle Schwankungen erfasst werden konnten. Deshalb wurden für die Messung der Abhängigkeit von der Schichtanzahl die Messdaten mit Hilfe eines MATLAB®-Skriptes ausgewertet, welches über alle Messpunkte der Schicht gemittelt hat. An jeder Probe wurden 10 Messungen vorgenommen und final über alle Mittelwerte gemittelt. Der Fehler wurde durch Mittelwertbildung der quadrierten Standardabweichungen und anschließendem Wurzel ziehen bestimmt.

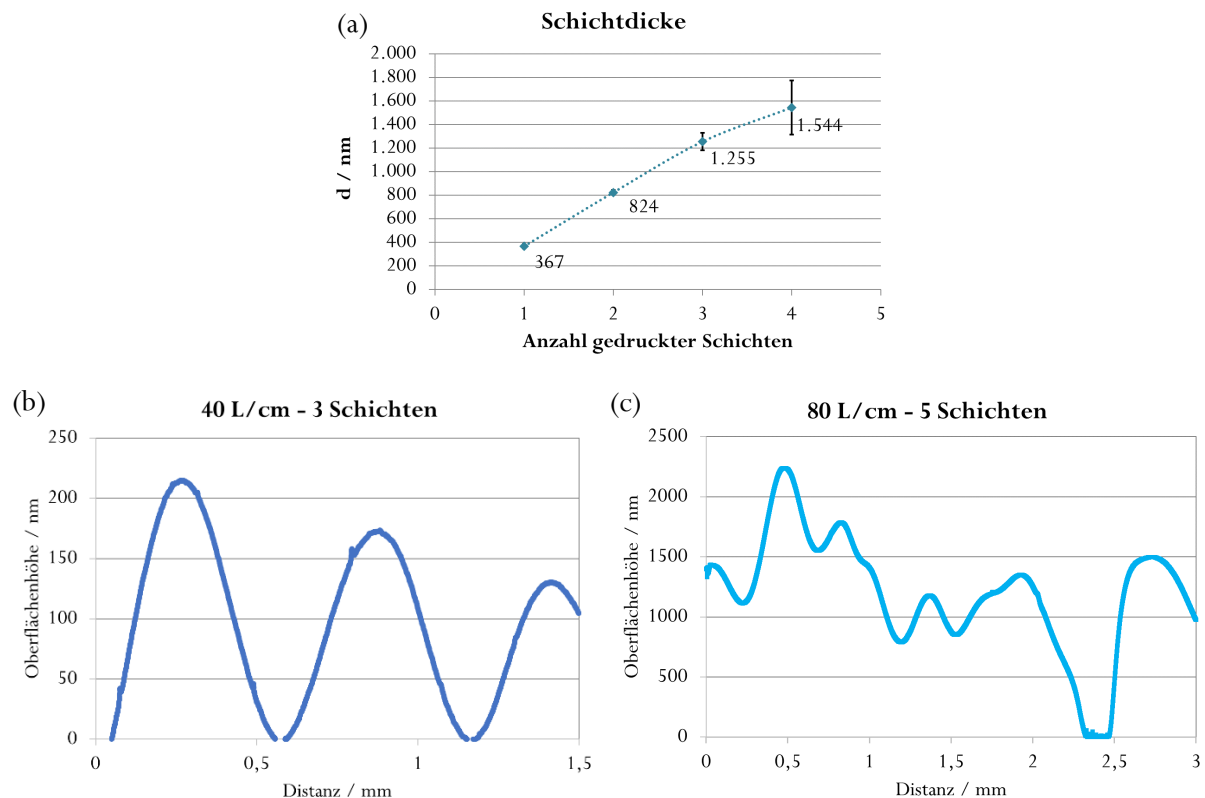


Abbildung 5.69: Gemessene Schichtdicke (Dektak, siehe Abschnitt 4.7) von D320#C in Abhängigkeit der Anzahl an gedruckten Schichten für eine Tiefdruckform mit 40 L/cm und 100 % Flächendeckung (a), sowie gemessene Welligkeiten gedruckter dielektrischer Schichten, hier am Beispiel einer dreischichtigen Probe aus einer Tiefdruckform mit 40 L/cm und 100 % Flächendeckung (b) sowie eine fünfschichtige Probe einer Tiefdruckform mit 80 L/cm und 100 % Flächendeckung (c). Man beachte die unterschiedlichen Skalen der Achsen. Die Proben wurden am GT+W Superproofer nach der Versuchsvorschrift in Abschnitt 4.6.3 hergestellt.

Verwunderlich ist dennoch, wie es zu solch massiven Schwankungen in der Schichtdicke kommen kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Aufbringen einer zusätzlichen Schicht nicht etwa ein Lückenfüllen bereits vorhandener Inhomogenitäten bewirkt, sondern auf hohen Stellen weiter Schicht aufgebaut wird und an niedrigen Stellen sich kaum Fluid anreichert. Betrachtet man die Oberflächenspannung in Abbildung 4.2 in Abhängigkeit des Feststoffanteils, so erkennt man, dass diese zunimmt. Eine auf dieser Beobachtung beruhende Erklärung für die Zunahme der Schichtdickeninhomogenitäten mit ansteigender Anzahl an gedruckten Schichten könnte die folgende sein:

Geht man für diese Erklärung davon aus, dass bei Ablösen der Tiefdruckform ein gleichmäßig dicker Film übertragen wird, so ist die neue zusätzliche Filmdicke an den bereits vorliegenden Bergen und Tälern gleich groß. Mit fortschreitender Zeit setzt nun die Verdunstung des Lösemittels ein. Diese

ist, aufgrund der größeren Oberfläche, stärker an den Spitzen der Berge als in den Tälern, siehe Abbildung 5.70. Hierdurch steigt der Feststoffanteil an den Spitzen an. Es entsteht ein Gradient des Feststoffanteils und somit auch der Oberflächenenergie. Für Fluide, wie das hier verwendete D320, siehe Abbildung 4.2, liegt nun auf den Erhöhungen ein Bereich hoher Oberflächenenergie vor, in den Vertiefungen niedriger Oberflächenenergie. Um diesen Gradienten auszugleichen, strömt nun feststoffhaltiges Fluid von den Bereichen niedriger Oberflächenenergie zu den Bereichen hoher Oberflächenenergie (Marangoni-Drage), wo sich folglich noch mehr Feststoff anreichert. Auf diese Weise lässt sich ein Aufbauen der Inhomogenitäten bei mehrschichtigem Druck nicht verhindern.

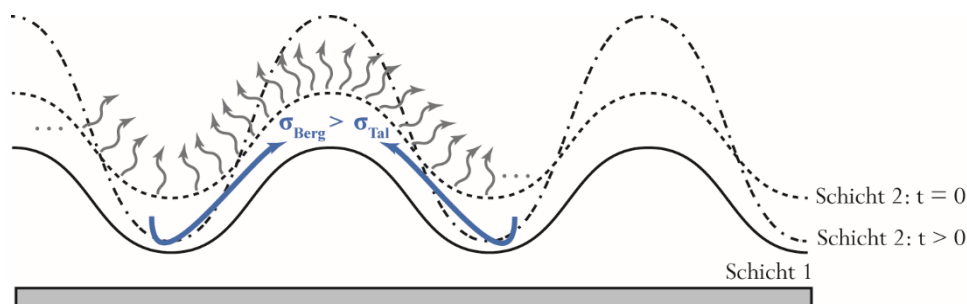


Abbildung 5.70: Filmbildung im mehrschichtigen Druck. Die gestrichelte Linie zeigt den gerade abgesetzten Nassfilm der zweiten Schicht bei $t=0$ auf der bereits vorhandenen 1. Schicht. In Grau dargestellt ist das Substrat. Durch vermehrte Verdunstung (symbolisiert durch eine hohe Anzahl an Verdunstungspfeilen) an den Erhöhungen der Inhomogenitäten (Berg) steigen an diesen Stellen der Feststoffanteil und somit die Oberflächenspannung. Fluid aus benachbarten Regionen (Tal) mit niedriger Oberflächenspannung strömt auf die Erhöhungen um diesen Gradienten auszugleichen (Marangoni-Drage). Für $t > 0$ steigt somit die Schichtdicke an den Bergen und sinkt in den Tälern.

Der einschichtige Druck ist somit zu empfehlen. Welche Durchschlagsspannungen im Tiefdruck in Abhängigkeit der Schichtdicke erreicht werden können, ist in Abbildung 5.71 (a) gezeigt. Die variierenden Schichtdicken wurden durch verschiedene Übertragungsvolumen der Tiefdruckzylinder einer IGT-G1, mit den in Abschnitt 4.6.3 beschriebenen Parametern, erzeugt. Die Durchschlagsspannung wurde an Kondensatoren, bestehend aus einer ITO-Bottom-Elektrode und einer Gold-Top-Elektrode, ermittelt. Für die Übertragungsvolumen 4,5 – 20 und 24 mL/m² wurden je 8 Kondensatoren vermessen, für die übrigen aus Platzgründen nur 7 Kondensatoren. Es ist also möglich mit D320#B* und einer IGT-G1 Labordruckmaschine einschichtige Dielektrika herzustellen, die in einem ITO-Gold-Plattenkondensator eine ausreichende Isolation mit einer Durchschlagsspannung bis zu 100 V aufweisen. Diese Versuchsreihe diente der Reproduktion der Ergebnisse von *Hassinen und Sandberg* (2013). Sie haben die Performance von D320-enthaltenden und im Tiefdruck erzeugten Transistoren und Invertern in Abhängigkeit des Übertragungsvolumens der Tiefdruckform untersucht.

Mit abnehmendem Übertragungsvolumen und somit abnehmender dielektrischer Schichtdicke wurde eine Zunahme der Mobilität und des On-Off-Ratios sowie eine Abnahme der Schwellspannung dokumentiert. Die Transistoren wurden allerdings nur bis 20 V betrieben. Eine Durchschlagsspannung wurde nicht erwähnt. Die von *Hassinen und Sandberg* verwendeten Übertragungsvolumen sind in (b) vergleichend mit dargestellt.

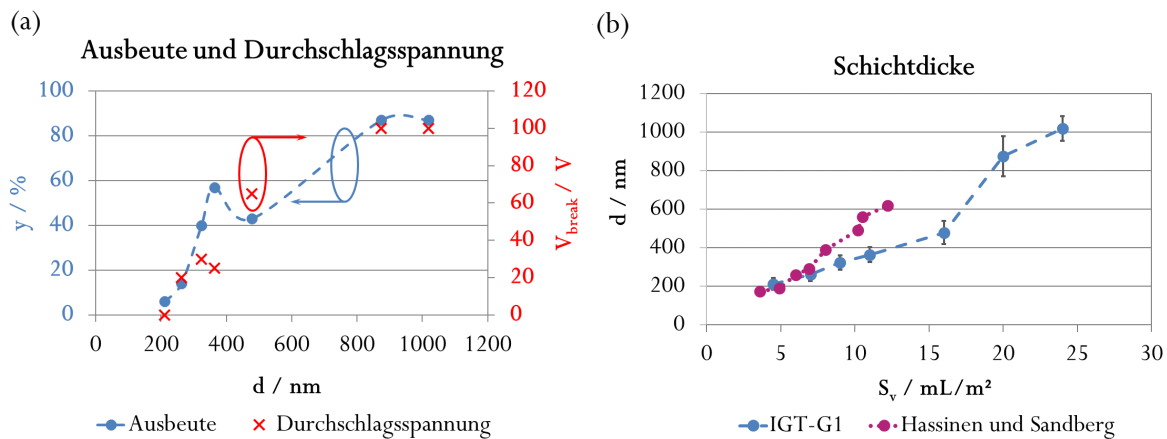


Abbildung 5.71: Ausbeute y und Durchschlagsspannung V_{break} in Abhängigkeit der Schichtdicke d des Halbleiters D320#B* (a) und Schichtdicke d in Abhängigkeit des Übertragungsvolumens S_v desselben Dielektrikums (Sensofar Plu Neox, siehe Abschnitt 4.7) (b). Die Bezeichnung „IGT-G1“ steht für eigens erzeugte und mittels Sensofar vermessene Proben, die Werte in dunklem Magenta entstammen der Literatur (*Hassinen, 2013*).

Inhomogenitäten treten jedoch auch in einschichtigen Proben auf. Außerdem lässt sich in manchen Fällen ein mehrschichtiger Druck nicht vermeiden. Liegen diese Inhomogenitäten im Bereich der Größenordnung der Transistorstrukturen, so kann es dazu kommen, dass, lateral gesehen, verschiedene Bereiche des Transistors verschieden starke elektrische Felder erfahren. Es konnte gezeigt werden, dass in im Tiefdruck nach 4.6.3 (IGT-F1 im Einfärbemodus) aus Transistorstrukturen aufgebauten Plattenkondensatoren die Leckströme I_{Leck} durch das Gate-Dielektrikum für den Source- und den direkt benachbart liegenden Drain-Kondensator unterschiedlich groß ($I_{Leck,s} = 1,2 \cdot 10^{-10} A$ und $I_{Leck,d} = 8,5 \cdot 10^{-11} A$) sind (*Ganz, 2013a*). In einer weiteren Versuchsreihe konnte der Einfluss im dynamischen Verhalten bisher jedoch nicht festgestellt werden. Um dies zu untersuchen wurden Proben identischer Schichtdicke im Spin-Coating und im Tiefdruck an GT+W Superproofer nach 4.6.3 hergestellt. Für die normierten Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen konnte kein Zusammenhang mit dem Herstellungsverfahren gefunden werden, jedoch eine klare Abhängigkeit von der Schichtdicke (716 nm entsprachen 1 Schicht; 1207 nm entsprachen 2 Schichten; 1746 nm entsprachen 3 Schichten). (*Ganz, 2013b; Pankalla, 2014*)

In diesem Abschnitt wird nun der Einfluss der Prozessierung des Dielektrikums anhand folgender Hypothese untersucht:

Hypothese 4

Bezüglich des Dielektrikums hängen das statische und das dynamische Verhalten eines organischen Feldeffekttransistors von der mittleren Schichtdicke ab. Eine dünne, homogene dielektrische Schicht gilt als erstrebenswert.

5.2.3.1 Einfluss der Schichtdicke des Dielektrikums

Zunächst wird der Einfluss der Schichtdicke anhand von im Spin-Coating nach Versuchsvorschrift in 4.5 hergestellten Proben des Dielektrikums D320#B*⁴² untersucht. Als Halbleiter diente im Spin-Coating aufgebracht PIF8-TAA ($v_{\text{rot}} = 1500 \text{ rpm}$). Die Rotationsgeschwindigkeiten v_{rot} wurden variiert zwischen 800 und 1800 rpm in 200 rpm Schritten⁴³. Hieraus resultieren die folgenden Schichtdicken:

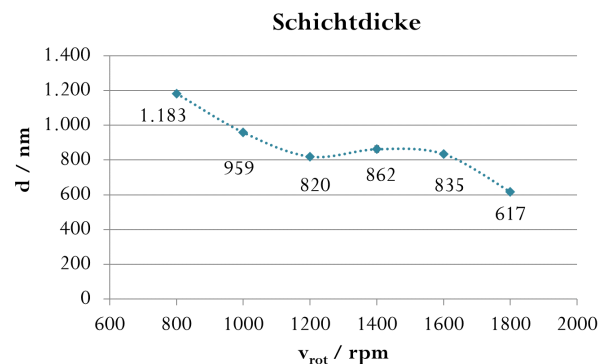


Abbildung 5.72: Schichtdicken d des Dielektrikums D320#B* in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit v_{rot} . Die Mittelwerte der Schichtdicken weisen eine Standardabweichung von maximal 15 nm auf. Die Fehlerbalken sind in dieser Abbildung somit nicht erkennbar.

⁴² Es ist anzumerken, dass es sich bei Dielektrikum D320#B* um die gleiche Herstellungscharge wie in D320#B handelt, jedoch eine andere Abfüllung verwendet wurde.

⁴³ Proben Halbleiter PIF8-TAA: Spin-Coating 1500 rpm, siehe Abschnitt 4.5; Dielektrikum D320#D Spin-Coating: 0358 – 800 rpm, 0359 – 1000 rpm, 0360 – 1200 rpm, 0361 – 1400 rpm, 0362 – 1600 rpm, 0363 – 1800 rpm, siehe Abschnitt 4.5. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Ladungsträgerschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Abbildung 5.73 zeigt die Ladungsträgerschwindigkeitsverteilung als Funktion der Schichtdicke d . Auf die übliche normierte Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet, um die Zunahme der Fläche unter der Verteilung (entspricht der Anzahl an Ladungsträgern N_{LT}) zeigen zu können. Mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit und abnehmender Schichtdicke verschieben sich die Verteilungen hin zu höheren Ladungsträgerschwindigkeiten.

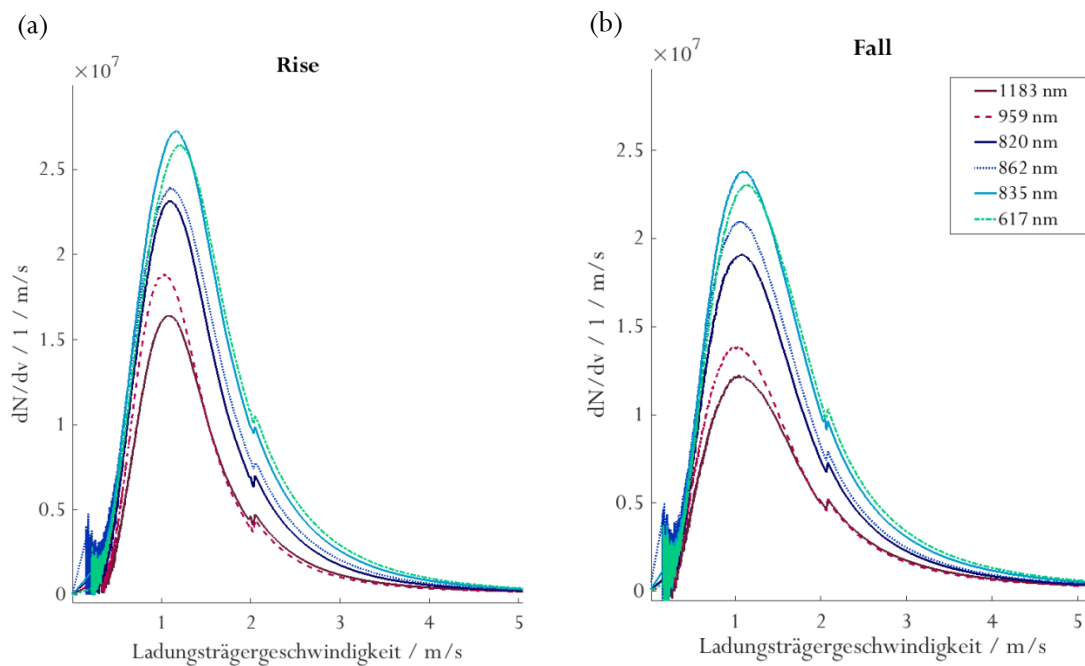


Abbildung 5.73: Ladungsträgerschwindigkeitsverteilung für verschiedene Rotationsgeschwindigkeiten des Dielektrikums D302#B*⁴³ der ansteigenden Flanke *Rise* (a) und der abfallenden Flanke *Fall* (b).

Die *Ladungsträgerschwindigkeiten am Verteilungsmaximum* $v_{Vert-max}$ spiegeln die Beobachtung der zunehmenden Ladungsträgerschwindigkeit mit abnehmender Schichtdicke wider, siehe Abbildung 5.74 (a). Die Probe mit einer Schichtdicke von 1182 nm folgt nicht diesem Trend. Mit einer Schichtdicke von 862 nm als Referenz, diese hatte sich aus einem Optimum an niedrigen Schwellspannungen und niedrigen Leckströmen aus statischen Messungen ergeben, weichen nur die Proben bei 959 und 617 nm Schichtdicke signifikant ab. Die *Halbwertsbreite* B_{50} nimmt mit zunehmender Schichtdicke ab, d. h. je dicker die dielektrische Schicht ist, desto schmaler wird die Verteilung, siehe (b). Auch hier weicht die Probe mit 1182 nm wieder leicht ab. Das *Tailing* schwankt für *Rise* zwischen 46 und 50 %, für *Fall* zwischen 41 und 45 %. Eine Abhängigkeit von der Schichtdicke ist nicht zu erkennen. Die *Anzahl der Ladungsträger* N_{LT} (c) nimmt mit zunehmender Schichtdicke ab, dabei scheint es einen

Sprung zwischen 800 und 1000 nm zu geben. Die sinkende Zahl an Ladungsträgern ist schlüssig, da durch die hohen Schichtdicken die Stärke des auf den Kanal wirkenden E-Feldes sinkt.

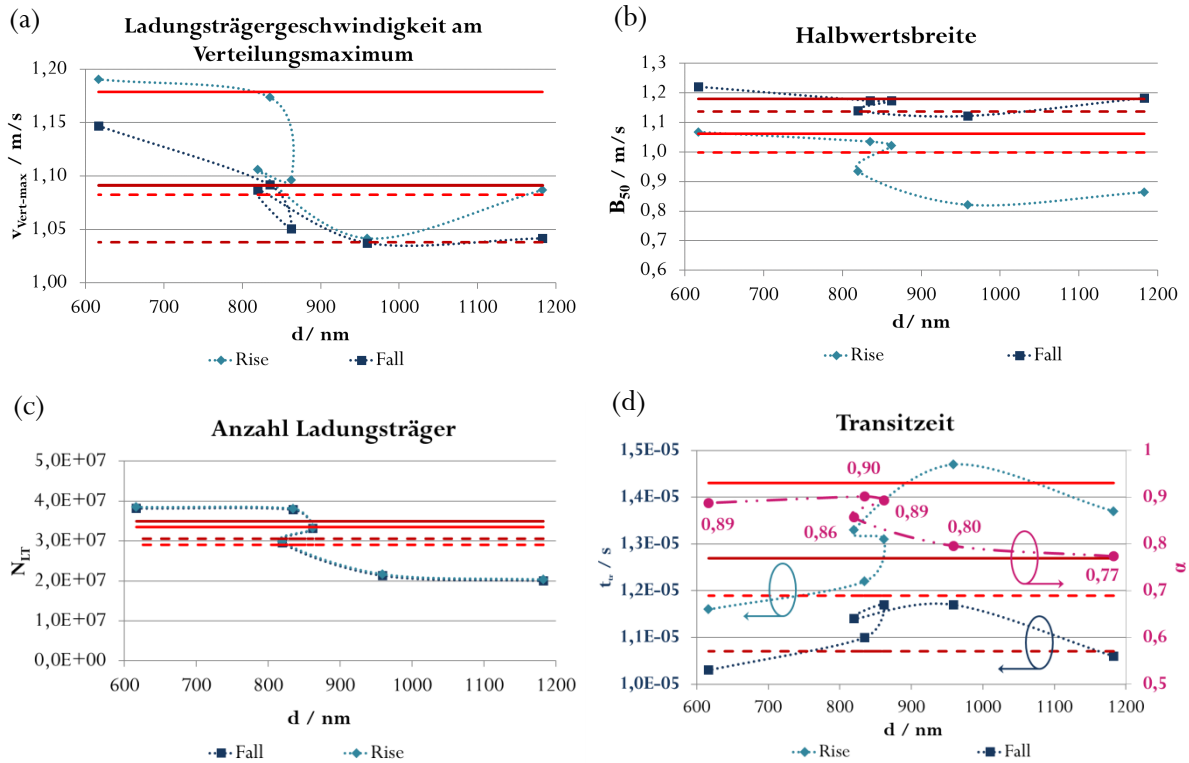


Abbildung 5.74: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Anzahl der Ladungsträger N_{IT} (c) und Transitzeit t_{tr} sowie Gütefaktor α (d) in Abhängigkeit der Schichtdicke d für das Dielektrikum D320#B*⁴³.

Transitzeit

Die Transitzeit t_{tr} ist für die Schicht der niedrigsten Dicke (617 nm) um 3,1 μs kleiner als die an der zweithöchsten Schichtdicke (958 nm), siehe (d). Dies bedeutet, dass eine Schichtdickenzunahme des Dielektrikums von 341 nm eine Erhöhung der Transitzeit um 3,1 μs bewirken kann. Auch der Gütefaktor α ist für niedrige Schichtdicken um 0,1 höher als für hohe. Es scheint hier zwei Bereiche zu geben: einen Bereich unterhalb 900 nm mit einem $\alpha > 0,85$ und einen Bereich oberhalb 900 nm mit einem $\alpha < 0,8$. Die Schichtdicke des Dielektrikums beeinflusst somit also auch die Güte des Kanals, wobei an dieser Stelle der elektrisch formierte Kanal und nicht der materialtechnisch gebildete gemeint ist. Da alle Schichten im Spin-Coating prozessiert sind, ist von einer gleichermaßen homogenen Grenzfläche auszugehen. Allerdings könnte es sein, dass es aufgrund der hohen Schichtdicke zu einer derart verlangsamten Trocknung kam, dass die Oberfläche des Halbleiters vom Lösemittel des Dielektrikums aufgeraut wurde.

Mobilität

Die *statische und dynamische Mobilität* weisen den beschriebenen Sprung bei 900 nm auch auf. Für niedrige Schichtdicken ist die Mobilität höher als für hohe Schichtdicken. Die Maximalwerte, d. h. der höchste und niedrigste Wert (1182 nm ausgenommen), zeigen ein Absinken der Mobilität von 7 % für die statische Mobilität, 21 % für die der Transitzeit t_{tr} und 13 % für die am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$. Dieser Abfall ist auf die Gate-Spannungsabhängigkeit der Mobilität zurückzuführen. Wie eingangs beschrieben, sinkt durch eine ansteigende Schichtdicke des Dielektrikums das effektiv im Kanal wirkende E-Feld.

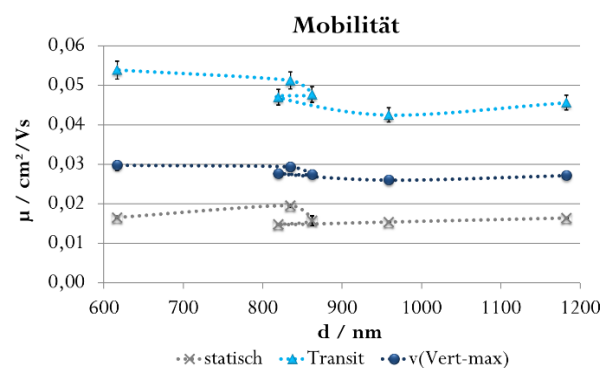


Abbildung 5.75: Statische und dynamische Mobilität μ in Abhängigkeit der Schichtdicke d des Dielektrikums D320#B*⁴³.

Zusammenfassung

Mit zunehmender Schichtdicke des Dielektrikums verschiebt sich somit die Verteilung hin zu niedrigeren Geschwindigkeiten. Die Peaks werden schmaler und die Anzahl der detektierten Ladungsträger N_{IT} sinkt. Bei ca. 900 nm wird eine Art Sprung in den Werten der Transitzeit t_{tr} , der Mobilität und dem Gütefaktor α festgestellt. Die Verwendung einer dünnen dielektrischen Schicht ist somit zu empfehlen.

An dieser Stelle wäre es wünschenswert eine Variations an Schichtdicken aus gedruckten Proben zu untersuchen. Hiefür würde sich nur der einschichtige Druck eignen, da - wie im folgenden Abschnitt vorgestellt - durch den mehrschichtigen Druck zunehmend Inhomogenitäten auftreten. Es ist jedoch nicht gelungen mit der Auswahl an vorhandenen Druckformen und dem Fluid D320#C (eine andere Charge stand zu diesem Zeitpunkt nicht mehr zur Verfügung) einschichtig gedruckte dielektrische Schichten herzustellen, die bis 60 V (statische Messung) eine ausreichende Isolierung aufweisen.

5.2.3.2 Einfluss der Anzahl an gedruckten Dielektrikumsschichten

Der Einfluss der Anzahl an gedruckten Dielektrikumsschichten wird im Folgenden anhand von Proben des Halbleiters SP400 und des Dielektrikums D320#C untersucht. Es ist anzumerken, dass D320#C in seinen Fluideigenschaften stark von den übrigen Chargen abweicht. Es ist nicht gelungen eine Spin-Coating-Reihe dieses Dielektrikums zu erstellen, da selbst bei niedrigsten Rotationsgeschwindigkeiten (400 rpm) aufgrund der geringen Schichtdicke fast ausschließlich Kurzschlüsse auftraten⁴⁴. Die Untersuchung zum Einfluss der Schichtanzahl hingegen konnten mit anderen Dielektrikumschargen als Charge #C nicht durchgeführt werden, da diese bereits aufgebraucht waren. Eine Vergleichbarkeit ist aus chemischer Sicht dennoch gegeben, da das dielektrische Polymer in allen Chargen identisch ist. Es ändert sich lediglich die Formulierung.

Die Versuche wurden unter Verwendung des GT+W Superproofers nach Abschnitt 4.6.3 im Tiefdruck durchgeführt. Die Transistoren wurden für den Druck des Dielektrikums orthogonal zur Druckrichtung ausgerichtet, d. h. die Kanäle lagen parallel zur Druckrichtung und möglichen Inhomogenitäten. Der Halbleiter wurde zum einen mittels Spin-Coating und zum anderen im Tiefdruck aufgebracht⁴⁵. Die Schichtdicke der Spin-Coating Probe beträgt $18,8 \pm 4,2$ nm. Die Probe liegt somit im MO-Bereich, siehe Abschnitt 5.2.1.1. Die Probe aus dem Tiefdruck hingegen liegt mit einer Schichtdicke von $27,0 \pm 6,8$ nm im KW-Bereich, siehe Abschnitt 5.2.1.1.

Schichtdicke

Die Schichtdicke in Abhängigkeit der Schichtanzahl wurde bereits in der Einleitung vorgestellt, siehe Abbildung 5.69 (a). Mit ansteigender Schichtanzahl steigen sowohl die mittlere Schichtdicke als auch die ermittelten Standardabweichungen. Sie betragen 367 ± 18 nm, 824 ± 21 nm, 1255 ± 74 nm und 1544 ± 228 nm.

⁴⁴ Es ist anzumerken, dass durch die halbautomatisierte Transistormessung, beschrieben in Abschnitt 3.2, die mechanische Beanspruchung des Dielektrikums höher ist, als bei Kontaktierung von Hand.

⁴⁵ Proben Halbleiter SP400 Tiefdruck GT+W Superproofer mit Druckform pHL140-VF-100 und $v_{\text{Druck}} = 3$ m/s: 0526 – 2 Schichten Dielektrikum, 0528 – 3 Schichten Dielektrikum, 0530 – 4 Schichten Dielektrikum, siehe Abschnitt 4.6.2; Halbleiter Spin-Coating 3500 rpm: 0525 – 2 Schichten Dielektrikum, 0527 – 3 Schichten Dielektrikum, 0529 – 4 Schichten Dielektrikum, siehe Abschnitt 4.5; Dielektrikum D320#C Tiefdruck GT+W Superproofer: Druckform pHL140-VF-100 jeweils 2, 3 oder 4 Schichten mit Zwischentrocknenen, siehe Abschnitt 4.6.3.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Abbildung 5.76 zeigt die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung als Funktion der Schichtanzahl des Dielektrikums D320#C für Proben mit einer gedruckten Schicht des Halbleiters SP400 (a) und für Proben mit einer im Spin-Coating erzeugten Schicht des Halbleiters SP400 (b). Die vierschichtig gedruckte Probe weicht für beide Prozesse des Halbleiters in der Höhe und der Position von den anderen beiden Verteilungen ab.

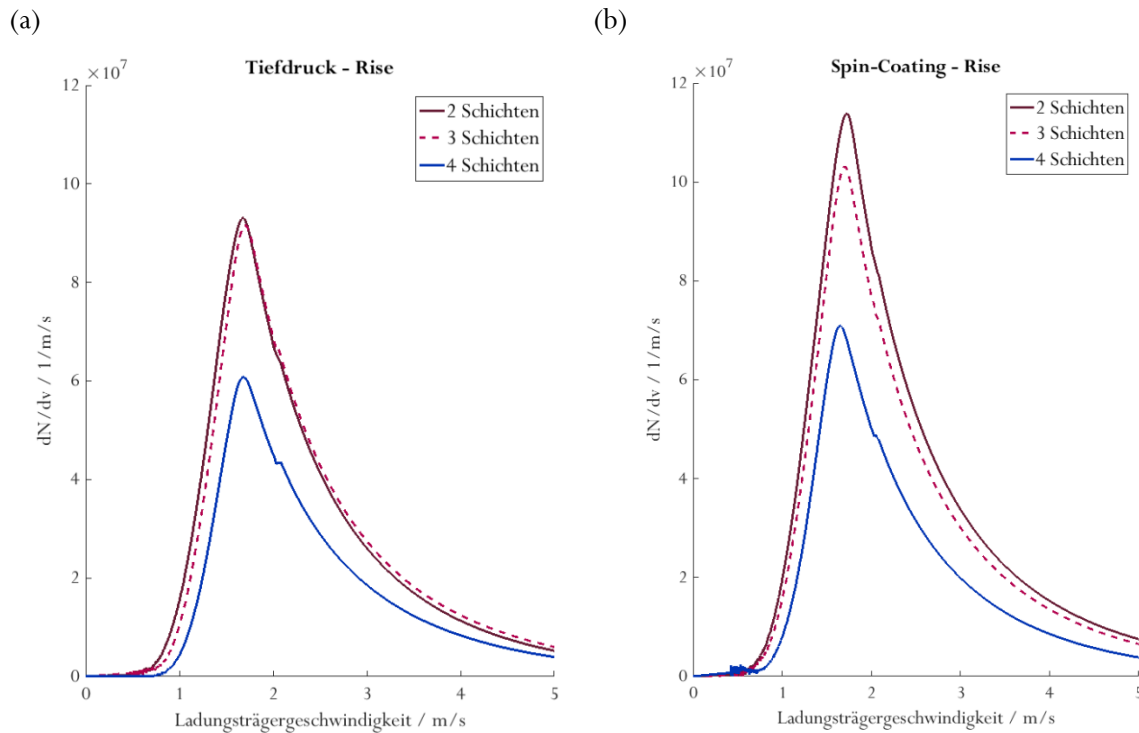


Abbildung 5.76: Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung als Funktion der Schichtanzahl des Dielektrikums für eine gedruckte (a) und eine im Spin-Coating hergestellte Schicht des Halbleiters SP400⁴⁵ (b). In beiden Fällen ist die ansteigende Flanke dargestellt.

Die *Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum* $v_{Vert-max}$ nimmt für die Proben mit im Spin-Coating erzeugtem Halbleiter mit zunehmender Schichtdicke des Dielektrikums ab, für den gedruckten Halbleiter steigt sie zunächst und fällt dann wieder ab, siehe Abbildung 5.77 (a). Alle Geschwindigkeiten der ansteigenden Flanke weichen signifikant von der Referenz Spin-Coating-2 Schichten ab. Für *Fall* wird für die Spin-Coating-Proben des Halbleiters ein Abfall der Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ und für die Druck-Proben ein Anstieg beobachtet. Jedoch ist keine Abweichung signifikant zur Referenz. Die *Halbwertsbreite* B_{50} (b) nimmt in allen Fällen mit ansteigender Schichtdicke des Dielektrikums ab. Auch die *Form der Verteilung* ändert sich in Abhängigkeit der

Schichtdicke, siehe (c). Mit zunehmender Schichtdicke nimmt das Tailing der Verteilung ab, d. h. die Verteilung verformt sich von einer eher symmetrischen Form (nahe 50 %) hin zu einem höheren Anteil an höheren Geschwindigkeiten. Dünnere dielektrische Schichten sorgen somit für eine optimalere Verteilungsform. Mit zunehmender dielektrischer Schichtdicke und somit abnehmendem auf den Kanal wirkenden elektrischen Feld, sinkt die *Anzahl der detektierten Ladungsträger* N_{LT} in allen Fällen signifikant (d).

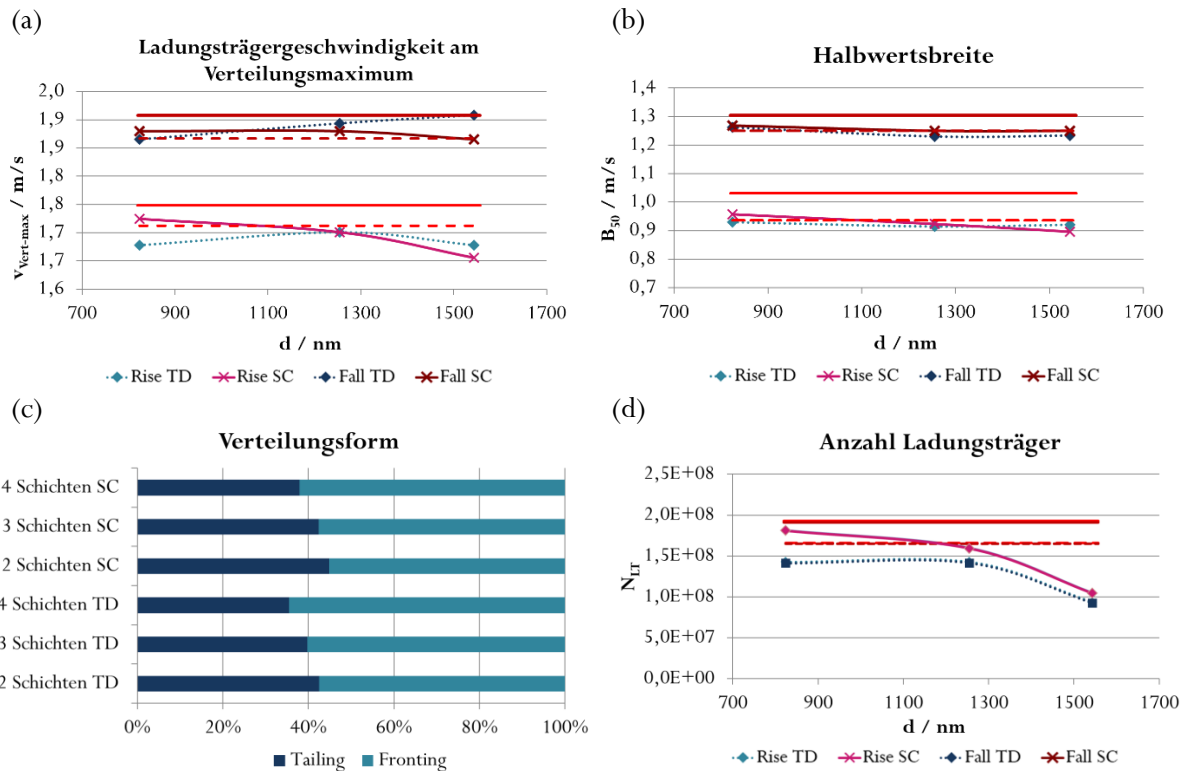


Abbildung 5.77: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Form der Verteilung (c) und Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (d) in Abhängigkeit der Dielektrikumsschichtdicke für je eine Probe mit gedrucktem und eine Probe mit im Spin-Coating hergestelltem Halbleiter SP400⁴⁵.

Transitzeit

Die in Abbildung 5.78 (a) dargestellte *Transitzeit* t_{tr} der abfallenden Flanke nimmt für beide Herstellungsmethoden, davon nicht signifikant im Spin-Coating, des Halbleiters linear mit ansteigender Schichtdicke des Dielektrikums ab. Die der ansteigenden Flanke nimmt für die Spin-Coating Proben zu und nimmt für die Tiefdruck-Proben zunächst ab und dann wieder leicht zu. Für hohe Schichtdicken wurden hohe Transitzeiten erwartet. Möglicherweise existieren, aufgrund der hohen Inhomogenitäten im Dielektrikum, an verschiedenen Stellen der Weite des Kanals Orte mit wesentlich geringerer

Schichtdicke. Durch ein lateral erhöht wirkendes elektrisches Feld, könnte es hier zur Detektion besonders schneller Ladungsträger kommen. Der Gütefaktor α erreicht die niedrigsten Werte für die höchsten Schichtdicken.

Mobilität

Die *statische Mobilität* nimmt mit ansteigender Schichtdicke zu, siehe Abbildung 5.77 (b). Sie ist höher für im Spin-Coating erzeugte Halbleiterschichten. Dies ist auf die Schichtdicke des Halbleiters zurückzuführen, siehe Abschnitt 5.2.1.1. Die *dynamischen Mobilitäten* nehmen in allen Fällen mit ansteigender Dielektrikumsschichtdicke zu. Dies ist auf die abnehmenden Transitzeiten bei gleichzeitig zunehmenden Schwellspannungen zurückzuführen, siehe Anhang A.1. Es ist anzumerken, dass die Leckströme aller Proben im Mittel im Bereich um 10 μA schwanken, die Off-Ströme in den vierschichtigen Proben hingegen aber um Faktor 10 niedriger sind (0,01 μA im Vergleich zu 0,1 μA).

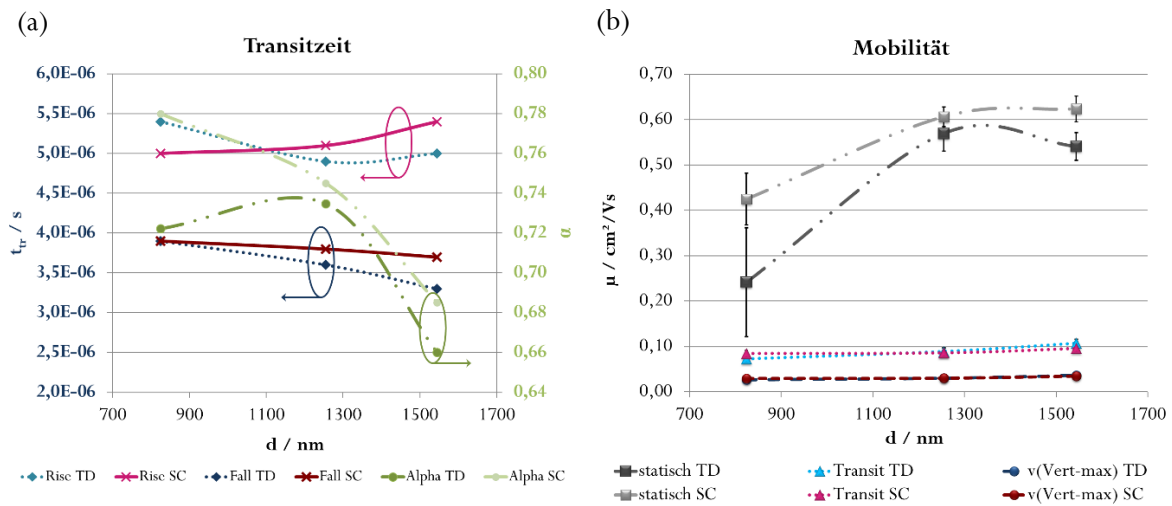


Abbildung 5.78: Transitzeit t_{tr} sowie Gütefaktor α (a) und Mobilität μ (b) in Abhängigkeit der Schichtdicke für Transistoren mit mehrschichtig gedrucktem Dielektrikum und im Tiefdruck sowie Spin-Coating erzeugtem Halbleiter SP400⁴⁵. Die Fehlerbalken, ermittelt aus Gleichung 3.26, der aus dynamischen Messungen ermittelten Mobilität sind hinter den Datenpunkten nicht erkennbar.

Zusammenfassung

Mit durch mehrschichtigen Druck (2 bis 4 Schichten) ansteigender Schichtdicke nehmen die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$, die Verteilungsbreite B_{50} , das Tailing sowie die Anzahl der detektierten Ladungsträger N_{LT} ab. Dies gilt sowohl für gedruckte als auch für im Spin-Coating erzeugte Halbleiterschichten. Transistoren mit niedriger dielektrischer Schichtdicke sind

somit zu empfehlen. Für die Transitzeit und die ermittelten statischen und dynamischen Mobilitäten zeigt sich – wenn für letztere auch nur schwach – ein anderes Bild. Hier punkten hohe Schichtdicken durch höhere Mobilitäten und niedrigere Transitzeiten. Letztere könnten auf Inhomogenitäten in der Schicht zurückzuführen sein, die ein lokal erhöhtes E-Feld verursachen. Dies ist möglich, da für die Ermittlung der Transitzeit nur die „schnellsten“ Ladungsträger benötigt werden. Warum die statische Mobilität und die Mobilität aus dem Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ ansteigen, kann nicht erklärt werden. Es ist außerdem zu erwähnen, dass der Gütefaktor α stark mit zunehmender Schichtdicke abnimmt. Durch den Vergleich der Herstellungsverfahren des Halbleiters lässt sich feststellen, dass die gleichen Trends für variierende dielektrische Schichtdicken beobachtet wurden, unabhängig von der Schichtdicke oder dem Herstellungsverfahren des Halbleiters. Lediglich die Absolutwerte weichen ab und die Trends sind für im Spin-Coating erzeugte Halbleiter ausgeprägter.

5.2.3.3 Einfluss der Lineatur bei gleicher Schichtdicke

Im Folgenden soll nun der Einfluss der Lineatur der Tiefdruckform in Transistoren annähernd gleicher Schichtdicke untersucht werden. Hierfür werden dielektrische Schichten im Tiefdruck mit dem GT+W Superproofer nach der Versuchsvorschrift in Abschnitt 4.6.3 unter Verwendung einer Tiefdruckform mit 40 L/cm und 100 % Flächendeckung (2 Schichten, 824 ± 21 nm) und einer Tiefdruckform mit 80 L/cm und 100 % Flächendeckung (3 Schichten, 779 ± 109 nm) hergestellt. Einher mit dem Wechsel der Druckform gehen also auch eine etwas niedrigere Schichtdicke (25 nm), aber dafür zunehmende Schwankungen (88 nm). Die verschieden erzeugten dielektrischen Schichten werden wie in 5.2.3.2 mit je einer Probe mit im Tiefdruck und einer mit aus Spin-Coating hergestelltem Halbleiter SP400⁴⁶ kombiniert. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die im Tiefdruck erzeugten Halbleiterschichten im Schichtdickenbereich KW befinden, d.h. die Kennwerte sind von der Schichtdicke unabhängig, und die im Spin-Coating erzeugten Halbleiterschichten im Bereich MO befinden, d.h. die Mobilitätswerte verhalten sich von der Schichtdicke unabhängig. Für die detaillierte Beschreibung dieser Bereiche sei auf Abschnitt 5.2.1.2 verwiesen.

⁴⁶ Proben: 0527 – Halbleiter SP400: Spin-Coating 3500 rpm; Dielektrikum D320#C: Tiefdruck mit pHL40-VF-100 2 Schichten, 0528 – Halbleiter SP400: Tiefdruck pHL140-VF-100, Dielektrikum D320#C: Tiefdruck mit pHL40-VF-100 2 Schichten; 0531 – Halbleiter SP400: Spin-Coating 3500 rpm; Dielektrikum D320#C: Tiefdruck mit pDE80-VF-100 3 Schichten, 0532 – Halbleiter SP400: Tiefdruck pHL140-VF-100, Dielektrikum D320#C: Tiefdruck mit pDE80-VF-100 3 Schichten; siehe Abschnitt bzw. Abschnitt e 4.5, 4.6.2 sowie 4.6.3. Der Tiefdruck wurde am GT+W Superproofer durchgeführt. Messung und Auswertung nach Abschnitt 3.2.2 für die gemittelten Messdaten von je 4 Transistoren pro Probe, siehe Anhang A1.

Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung und Kennwerte

Abbildung 5.79 zeigt die normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung an den ansteigenden Flanken für gedruckte dielektrische Schichten als Funktion der Lineatur. In Abbildung 5.79 (a) ist ersichtlich, dass für im Tiefdruck hergestellte Halbleiter im Schichtdickenbereich KW die Verteilungen stark überlappen, während in Abbildung 5.79 (b) sowohl eine Verschiebung als auch eine Verformung für im Spin-Coating hergestellte Halbleiter des Schichtdickenbereichs MO beobachtet wird.

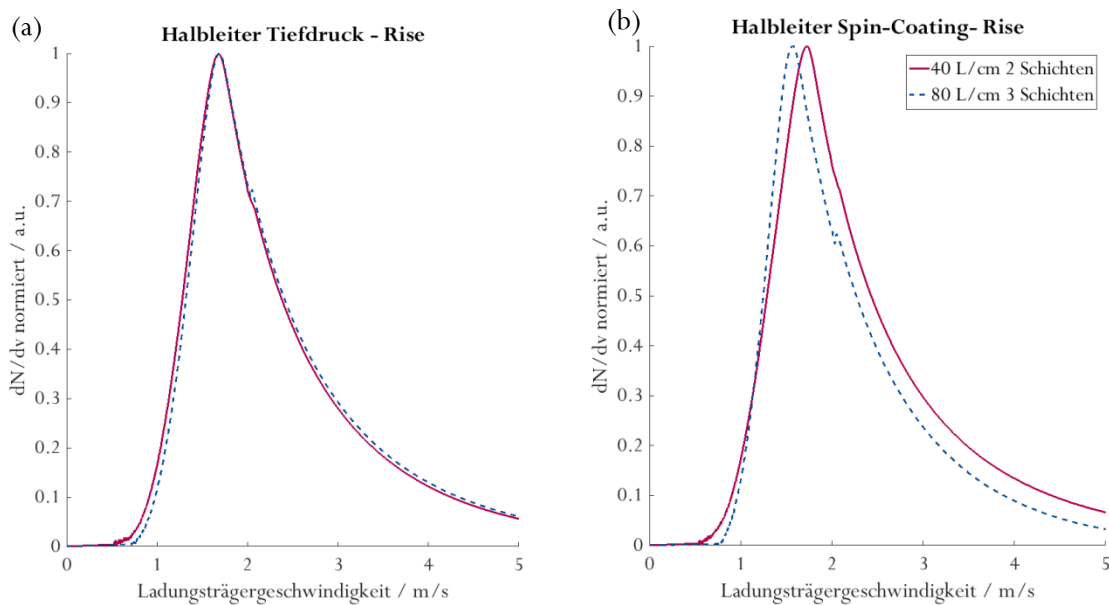


Abbildung 5.79: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung als Funktion der Lineatur des Drucks der dielektrischen Schicht für im Tiefdruck (a) und im Spin-Coating hergestellte Halbleiter (b). In beiden Fällen ist die ansteigende Flanke gezeigt.

Die Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ ist in Abbildung 5.80 (a) dargestellt und nimmt für die Proben mit im Spin-Coating hergestelltem Halbleiter mit höherer Lineatur ab, für die mit im Tiefdruck hergestelltem Halbleiter leicht zu. Als Referenz dient erneut die Probe SC 40 L/cm 2 Schichten. Die Breite der Verteilung B_{50} in Abbildung 5.80 (b) nimmt in allen Fällen ab. Das Tailing ist für die 80 L/cm Proben kleiner, siehe Abbildung 5.80 (c). Dieser Effekt ist für die im Spin-Coating erzeugten Halbleiterschichten stärker ausgeprägt. Auch hier bestätigt sich die Beobachtung der vorherigen Versuchsreihe: mit zunehmender Inhomogenität – welche im vorangestellten Abschnitt noch nicht von der Schichtdicke separiert betrachtet werden konnte – verformt sich die Verteilung hin zu höheren Geschwindigkeiten. Die in Abbildung 5.80 (d) dargestellte Anzahl der detektierten Ladungsträger N_{LT} nimmt interessanterweise in beiden Fällen für höhere Lineaturen ab.

Transitzeit

Die Transitzeit t_{tr} , gezeigt in Abbildung 5.81 (a), nimmt unerwarteterweise für die im Spin-Coating hergestellten Proben zu, während sie für die im Tiefdruck erzeugten Proben leicht abnimmt. Für letztere sei auf die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Interpretation der Inhomogenitäten verwiesen, für ersteres Verhalten gibt es nach aktuellem Wissensstand keine schlüssige Erklärung. Der Gütefaktor α nimmt für beide Halbleiterarten ab, für Spin-Coating stärker als für den Tiefdruck.

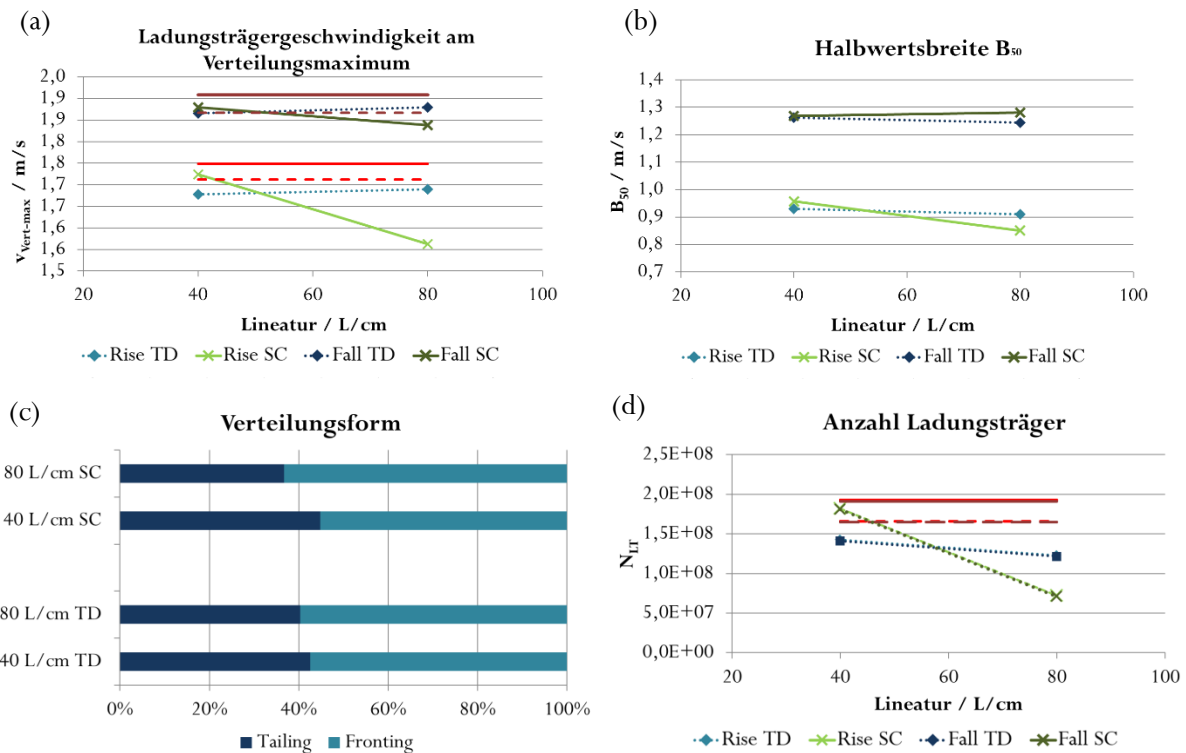


Abbildung 5.80: Ladungsträrgeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Form der Verteilung (c) und Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (d) in Abhängigkeit der Lineatur des gedruckten Dielektrikums D320#C für je eine Probe mit gedrucktem und eine Probe mit im Spin-Coating hergestelltem Halbleiter SP400⁴⁶. In rot dargestellt sind die Minimum- (gestrichelt) und Maximumtoleranz. In (d) liegen die Werte der ansteigenden und der abfallenden Flanke perfekt aufeinander und sind somit nicht sichtbar.

Mobilität

Die statische Mobilität zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Transitzeit, sie nimmt für die SC-Proben ab, während sie für die TR Proben leicht zunimmt. Im dynamischen Verhalten jedoch, nehmen die Werte aller vier Proben sowohl für die Transitzeit als auch für die häufigsten Ladungsträger zu. Mit höheren Inhomogenitäten kann also ein leichter Anstieg der Mobilität verzeichnet werden. Außerdem liegen dann

die Werte für SC und TD-Proben des Halbleiters weiter auseinander. Eine Erklärung für das abweichende Verhalten der statischen Mobilität des SC-Halbleiters konnte nicht gefunden werden.

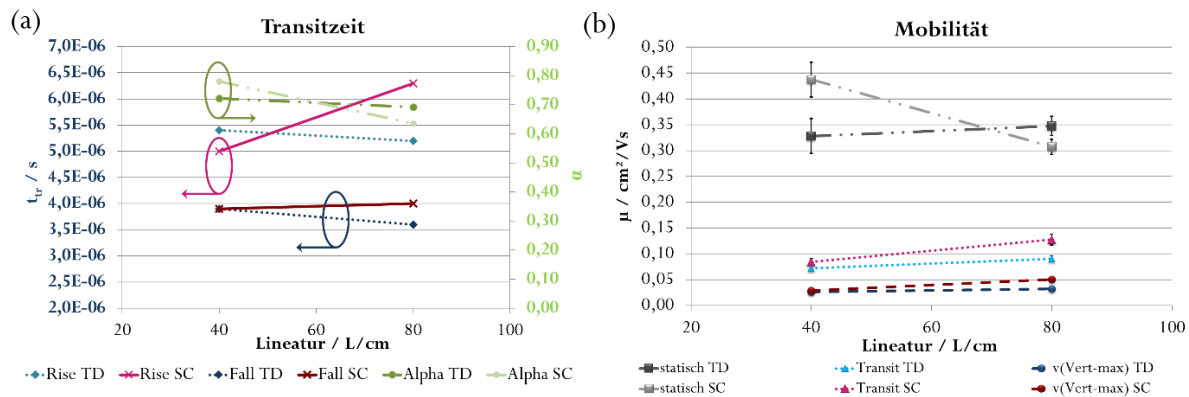


Abbildung 5.81: Transitzeit t_{tr} und Mobilität μ in Abhängigkeit der Lineatur für gedruckte dielektrische Schichten (D320#C) in Kombination mit im Tiefdruck und im Spin-Coating hergestellten Halbleiterschichten (SP400)⁴⁶.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich über die Abhängigkeit der Transistorperformance von der Lineatur gedruckter dielektrischer Schichten unter annähernd gleicher Schichtdicke sagen: Bei höherer Lineatur nimmt die Breite der Verteilung B_{50} zu und sie verformt sich in Richtung höherer Geschwindigkeiten. Diese Effekte sind unter Verwendung von im Spin-Coating erzeugten Halbleiterschichten stärker als bei Verwendung des Tiefdrucks. Die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} ist ebenfalls geringer für hohe Lineaturen. Die Ladungsträgergeschwindigkeiten am Verteilungsmaximum $v_{Vert-max}$, die Transitzeiten t_{tr} sowie die statischen Mobilitäten zeigen ein unterschiedliches Verhalten für die beiden Halbleitertypen. Der Gütefaktor α und die dynamischen Mobilitäten zeigen hingegen wieder eine klare Tendenz zu niedrigerem α und höherer Mobilität bei höherer Lineatur.

5.2.3.4 Beurteilung der Hypothese 4

Hypothese 4:

Bezüglich des Dielektrikums hängen das statische und das dynamische Verhalten eines organischen Feldeffekttransistors von der mittleren Schichtdicke ab. Eine dünne, homogene dielektrische Schicht gilt als erstrebenswert.

In den in Abschnitt 5.2.3.1 und 5.2.3.2 beschriebenen Versuchsreihen wird gezeigt, dass sowohl das statische als auch das dynamische Verhalten gedruckter OFETs von der Schichtdicke des Dielektrikums abhängen. Dies gilt sowohl für den Halbleiter PIF8-TAA bei Messungen mit vorgespanntem Gate als auch für den Halbleiter SP400 bei Messungen ohne angelegte Gate-Spannung. In beiden Fällen zeigen dünne dielektrische Schichten die besten Performances in Form der Ladungsträgergeschwindigkeiten, der Form der Verteilung sowie den Mobilitäten, siehe Tabelle 5.20.

Tabelle 5.20: Trends der Kennwerte der drei Versuchsreihen aus 5.2.3.1, 5.2.3.2 und 5.2.3.2. Die Trends wurden ermittelt für im Spin-Coating erzeugte Halbleiterschichten. Sie sind angegeben für abnehmende Schichtdicken (Spin-Coating und Schichtanzahl) sowie eine abnehmende Lineatur.

Parameter	Spin-Coating	Schichtanzahl	Lineatur
$V_{\text{Vert-max}}$	↗	↗	↗
Verteilungsbreite bei 50 % B50	↗	↗	↗
Tailing bei 50 %	○	↗	↗
Anzahl der Ladungsträger	↗	↗	↗
Transitzeit t_{tr}	↘	○	↘
Gütefaktor α	↗	↗	↗
$\mu(\text{statisch})$	↗	↘	↗
$\mu(\text{dynamisch})$	↗	↘	↘

Mit der Untersuchung des Einflusses der Lineatur für den Druck des Dielektrikums, bzw. der mit dieser einhergehenden Inhomogenität in der Schicht, kann gezeigt werden, dass bei annähernd gleicher dielektrischer Schichtdicke die homogenere Schicht (40 L/cm mit 2 Schichten) die besseren Kennwerte liefert. Es ist zu beachten, dass die Kennwerte für gedruckte und im Spin-Coating erzeugte Halbleiter voneinander abweichen.

Auffällig ist, dass mit zunehmender Inhomogenität der dielektrischen Schicht (gemessen an der Standardabweichung der Schichtdickenwerte) die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen hin zu höheren Geschwindigkeiten verformt sind (gemessen am zunehmenden Tailing). Dies bedeutet, dass

durch den Einsatz inhomogener dielektrischer Schichten eine höhere Bandbreite an scheinbaren Ladungsträgergeschwindigkeiten auftritt, bis die häufigste Geschwindigkeit erreicht ist. Dies kann durch mehrere Parameter bedingt sein: zum einen könnten durch das inhomogene E-Feld die Zahl an möglichen Transportwegen durch den Kanal steigen, zum anderen könnte durch das mehrschichtige Drucken die Grenzschicht unter der mechanischen Belastung gelitten haben. Eine weitere Möglichkeit ist der durch den wiederholten Druck häufige Kontakt mit Lösemitteln, die die Schichten angreifen und aufräumen bzw. Rückstände hinterlassen können.

Die Hypothese wird somit angenommen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit zwei Aspekten: Zum einen erfolgt eine Untersuchung der Abhängigkeit der elektrischen Performance gedruckter organischer Feldeffekttransistoren von Prozessparametern aus dem Herstellungsprozess. Zum anderen gilt es die Frage zu beantworten, ob die üblicherweise verwendeten Methoden der optischen Charakterisierung und der elektrischen Kennlinienanalyse ausreichen, um Druckprozesse bezüglich einer elektrischen Güte zu optimieren. Hierfür werden gedruckte bottom-contact top-gate Transistoren in verschiedenen Verfahren und unter verschiedenen Parametern hergestellt und mittels Kennlinienanalyse zur Ermittlung des statischen Verhaltens, eines elektronischen Time-Of-Flight-Verfahrens zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens und optischen Methoden untersucht.

Das elektronische Time-Of-Flight-Verfahren wird im Rahmen dieser Arbeit auf die Anforderung der hier zu untersuchenden gedruckten Transistoren, bezüglich Messparametern und Auswertemethodik angepasst. Im Wesentlichen wird bei diesem Verfahren ein Rechteckpuls angelegt und die Pulsantwort des Transistors über einen Messwiderstand aufgezeichnet. Diese wird anschließend mit Hilfe einer von Sauer (2015) entwickelten Gleichung in MATLAB® in eine Verteilung der Ladungsträgergeschwindigkeiten transformiert, welcher das Modell der Ladungsträgerlaufzeiten zu Grunde liegt. Um diese Verteilung quantitativ erfassen und verschiedene Verteilungen miteinander vergleichen zu können, werden aus diesen eigens definierte Kennwerte extrahiert. Diese Kennwerte – sowie die physikalischen Größen und Vorgänge, die sie beschreiben – werden in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter analysiert und diskutiert. Die hier vorgestellte Methodik zur Analyse gedruckter Transistoren in bottom-contact top-gate Architektur ist bisher nicht bekannt. Vergleichend dazu werden die aus statischer Kennlinienmessung extrahierten Größen Mobilität und Schwellspannung bewertet. Stellenweise wird zusätzlich eine optische Begutachtung zur Interpretation hinzugezogen.

Die mittels Tiefdruck, Flexodruck oder Spin-Coating hergestellten bottom-contact top-gate Transistoren basieren auf zwei verschiedenen amorphen Polymerhalbleitern – PIF8-TAA und lisicon® SP400 – sowie dem Polymerdielektrikum lisicon® D320.

Die Untersuchung der Einflüsse der Druckprozessparameter erfolgt anhand von Hypothesen:

In Hypothese 1 wird postuliert, dass die elektrische Performance der gedruckten Transistoren allein von der Schichtdicke des Halbleiters und nicht vom Herstellungsprozess abhängt. Anhand von im Spin-Coating erzeugten Proben unterschiedlicher Schichtdicke wird für beide Halbleiter eine Abhängigkeit der Performance von der Schichtdicke gezeigt. Es können jedoch für beide Halbleiter Plateaubereiche definiert werden, in denen sich die aus der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung extrahierten Kennwerte nicht mehr signifikant in Abhängigkeit der Schichtdicke ändern. Dieser erstreckt sich für den Halbleiter PIF8-TAA von 40-85 nm und für den Halbleiter SP400 von 27-67 nm. Die Abhängigkeit vom Herstellungsprozess wird anhand von Proben mit identischer Schichtdicke, die aber auf verschiedene Arten – im Tiefdruck, Flexodruck und Spin-Coating – hergestellt wurden, gezeigt. An beiden Halbleitern werden prozessbedingte Unterschiede sowohl im statischen als auch im dynamischen Verhalten festgestellt, welche nur stellenweise übereinstimmen. Die Hypothese wird somit verworfen.

Mittels Hypothese 2 wird analysiert, ob statische und optische Charakterisierungsmethoden ausreichen um einen Druckprozess für organische Feldeffekttransistoren anhand der Druckgeschwindigkeit und der Druckformparameter zu optimieren. Bezüglich der Druckgeschwindigkeit zeigt sich für den Halbleiter PIF8-TAA, dass die optische Güte einer Schicht – starke Defekt ausgenommen – die elektrische Güte nicht hinreichend widerspiegelt. Es ergeben sich aus statischer und dynamischer Sicht die gleichen Prozessfenster für den Halbleiter PIF8-TAA, für den Halbleiter lisicon® SP400 weichen sie voneinander ab. Bei Analyse der Druckformparameter ergibt sich die beste Performance für beide Halbleiter für niedrige Lineaturen – in diesem Fall 40 L/cm – mit einer hohen Flächendeckung – in diesem Fall 100 %. Die aus den Kennlinien erhaltenen statisch ermittelten Mobilitäten stimmen nur teilweise mit den Beobachtungen aus dynamischer Messung überein. Die Optima weichen voneinander ab. Die Ausrichtung der Transistoren in Bezug zur Druckrichtung zeigt keinen Einfluss auf die Performance an sich, sie vermag jedoch Unterschiede zwischen anderen Prozessparametern bei orthogonaler Ausrichtung zu verringern. Auch Hypothese 2 wird verworfen.

Hypothese 3 besagt, dass sich der Flexodruck unter Verwendung eines Nyloflex ACE Polymer-Klischees nicht zur Herstellung gedruckter Transistoren aus auf Mesitylen-basierten Fluiden eignet, da organische Bestandteile während des Druckvorgangs aus dem Klischee herausgelöst werden und sich in der Halbleiterschicht niederschlagen. Unter Verwendung verschiedener Herstellungsprozesse kann gezeigt werden, dass mit Klischeematerial verunreinigte Transistoren eine schlechtere Performance aufweisen.

Der Flexodruck eignet sich in dieser Materialkombination somit nicht zur Herstellung von PIF8-TAA-Transistoren, die Hypothese wird angenommen.

Anhand von Hypothese 4 wird untersucht, ob das statische und das dynamische Verhalten eines Transistors von der Schichtdicke des Dielektrikums lisicon® D320 abhängen und eine Verbesserung dieser für dünne und homogene dielektrische Schichten vorliegt. Dies kann für beide Halbleiter bestätigt werden. Obwohl homogenere Schichten die besseren Kennwerte an sich liefern, sind die Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilungen für stärkere Inhomogenitäten hin zu höheren Ladungsträgergeschwindigkeiten verformt. Die Hypothese wird angenommen.

Es kann gezeigt werden, dass sich das elektronische Time-Of-Flight-Verfahren zur Detektion von Einflüssen aus dem Druckprozess auf die elektrische Güte organischer Feldeffekttransistoren eignet. Die Extraktion der definierten Kennwerte aus diesem auf dynamischem Verhalten beruhenden Messverfahren erlaubt es Prozessfenster oder Plateaubereiche zu definieren, in denen sich das dynamische Verhalten der gedruckten Transistoren in Abhängigkeit eines bestimmten Prozessparameters nicht ändert. Die erhaltenen Ergebnisse sind schlüssig und lassen sich mit anderen Beobachtungen und Literaturwerten korrelieren, wie beispielsweise das Überschreiten einer minimalen Halbleiterschichtdicke, die mit der Elektrodenhöhe zusammenhängt. Als kritisch wird jedoch die starke Abhängigkeit der aus dynamischen Messungen ermittelten Mobilität von der Schwellspannung bei Messungen am Halbleiter SP400 bewertet. Ebenfalls zeigt dieses Verfahren andere Prozessfenster auf als sich aus statischen oder optischen Messungen ergeben würden. Es kann somit gezeigt werden, dass aus statischen Verfahren ermittelte Kriterien nicht ausreichen einen Transistor bezüglich seiner Eignung der Funktionalität in einer Schaltung auszuwählen.

Ausblick

Die Ermittlung der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung mit Hilfe des elektronischen Time-Of-Flight-Verfahrens für einen Transistor beinhaltet eine Messdauer von 30 s. Diese Zeit umfasst eine Wartezeit von 20 s nach dem Ausschluss von Licht sowie eine Speicherdauer von 9 s des Oszilloskops für zwei Kanäle. Die Messdauer an sich beträgt weniger als eine Sekunde. Die Auswertung in MATLAB® nimmt aktuell ca. 7 s in Anspruch. Das Aufzeichnen der Ausgangs- und Transferkennlinien mit dem halbautomatisierten Transistormessplatz hat eine reine Messzeit von ca. 3,5 min. Die anschließende Auswertung mit Excel dauert eine weitere Minute. Das elektronische Time-Of-Flight-Verfahren ist somit weniger zeitintensiv als statische Messmethoden, könnte unter Verwendung eines kamerabasierten

Positioniersystems automatisiert werden und eignet sich zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens gedruckter Transistoren. Es könnte somit zur Prozessoptimierung und Prozesskontrolle eingesetzt werden. Auf Basis eines größeren Stichprobenumfangs könnten Toleranzen eines Prozesses ermittelt werden und dieser durch Stichprobenkontrolle überwacht werden.

Ebenfalls realisierbar wäre der Einsatz eines der elektronischen Time-Of-Flight-Messung analogen Messaufbaus in einem Sensorarray. Es ist gezeigt worden, dass Änderungen im Verhalten der Transistoren auf photonische Reize und Änderungen der Gate-Kapazität detektiert werden können. Die Sensordetektion könnte in Form des Überschreitens eines bestimmten Stromwertes erfolgen. Die Transistoren könnten somit als Photodetektor oder kapazitiver Sensor in Touch-Anwendungen fungieren.

7. Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- (Allard, 2008) Allard, S.; Forster, M.; Souharche, B.; Thiem, H.; Scherf, U., *Organic semiconductors for solution-processable field-effect transistors (OFETs)*, **2008**, Angewandte Chemie (International ed. in English) 47 (22), S. 4070–4098, DOI: 10.1002/anie.200701920.
- (Andersson, 2016) Andersson, M.; Fahlmann, M., *Organic Semiconducting Materials*, In: Nisato, Lupo und Ganz (Hg.): *Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications*, **2016**, Pan Stanford Publishing, Singapur, S. 12–45, ISBN: 978-981-4669-74-0.
- (Armin, 2014) Armin, A.; Juska, G.; Ullah, M.; Velusamy, M.; Burn, P. L.; Meredith, P.; Pivrikas, A., *Balanced Carrier Mobilities: Not a Necessary Condition for High-Efficiency Thin Organic Solar Cells as Determined by MIS-CELIV*, **2014**, Adv. Energy Mater. 4 (4), S. 1300954. DOI: 10.1002/aenm.201300954.
- (Atkins, 2006) Atkins, P. W.; Paula, J. de; Trapp, C. A.; Zillgitt, M., *Physikalische Chemie*, 4., vollständig überarbeitete Auflage, **2006**, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN: 978-3-527-31546-8.
- (Bao, 2007) Bao, Z.; Locklin, J. (Hg.), *Organic field-effect transistors* (Optical science and engineering series), **2007**, Taylor & Francis, Boca Raton, ISBN: 978-0-849-38080-8.
- (Basu, 2006) Basu, D.; Wang, L.; Dunn, L.; Yoo, B.; Nadkarni, S.; Dodabalapur, A.; Heeney, M.; McCulloch, I., *Direct measurement of carrier drift velocity and mobility in a polymer field-effect transistor*, **2006**, Appl. Phys. Lett. 89 (24), S. 242104. DOI: 10.1063/1.2405378.
- (Basu, 2007) Basu, D., *Charge Transport in Polymer Semiconductors*, **2007**, Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
- (Basu, 2009) Basu, D.; Dodabalapur, A., *Drift Velocity and Drift Mobility Measurement in Organic Semiconductors Using Pulse Voltage*, **2009**, Adv. Polym. Sci. 223, S. 73-112, DOI: 10.1007/12_2009_4.
- (Bechtold, 2017) Bechtold, M., *Plasma- und Korona-Behandlung: Vergleichende Untersuchung der Oberflächenmodifizierung von Folien und Glassubstraten*, **2017**, Bachelorthesis, Technische Universität Darmstadt.

- (Boer, 2005) Boer, B. de; Hadipour, A.; Mandoc, M. M.; van Woudenbergh, T.; Blom, P. W. M., *Tuning of Metal Work Functions with Self-Assembled Monolayers*, **2005**, Adv. Mater. 17 (5), S. 621–625, DOI: 10.1002/adma.200401216.
- (Bornemann, 2013) Bornemann, N., *Characterization and Investigation of Large-Area, Ultra-Thin Gravure Printed Layers*, **2013**, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, tuprints: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/3847>.
- (Boudinet, 2010) Boudinet, D.; Benwadih, M.; Altazin, S.; Gwoziecki, R.; Verilhac, J. M.; Coppard, R.; Le Blevenec, G.; Chartier, I.; Horowitz, G., *Influence of the semi-conductor layer thickness on electrical performance of staggered n- and p-channel organic thin-film transistors*, **2010**, Org. Electron. 11 (2), S. 291–298, DOI: 10.1016/j.orgel.2009.11.008.
- (Braga, 2009) Braga, D.; Horowitz, G., *High-Performance Organic Field-Effect Transistors*, **2009**, Adv. Mater. 21 (14-15), S. 1473–1486, DOI: 10.1002/adma.200802733.
- (Bruce, 2007) Bruce, P. Y.; Lazar, T.; Reiser, O., *Organische Chemie*. 1. dt. Aufl., **2007**, Pearson Education Deutschland GmbH, München, ISBN: 978-3-8273-7190-4.
- (Bürge, 2003) Bürge, L.; Friend, R. H.; Sirringhaus, H., *Formation of the accumulation layer in polymer field-effect transistors*, **2003**, Appl. Phys. Lett. 82 (9), S. 1482–1484, DOI: 10.1063/1.1556564.
- (Burns, 1969) Burns, J. R., *Large-signal transit-time effects in the MOS transistor*, **1969**, RCA REVIEW 30, S. 15–35.
- (Cambell, 1997) Campbell, I. H.; Kress, J. D.; Martin, R. L.; Smith, D. L.; Barashkov, N. N.; Ferraris, J. P., *Controlling charge injection in organic electronic devices using self-assembled monolayers*, **1997**, Appl. Phys. Lett. 71 (24), S. 3528–3530, DOI: 10.1063/1.120381.
- (Chan, 2013) Chan, C. Y. H.; Tsung, K. K.; Choi, W. H.; So, S. K., *Achieving time-of-flight mobilities for amorphous organic semiconductors in a thin film transistor configuration*, **2013**, Org. Electron. 14 (5), S. 1351–1358, DOI: 10.1016/j.orgel.2013.02.007.
- (Choi, 2014) Choi, D.; An, T. K.; Kim, Y. J.; Chung, D. S.; Kim, S. H.; Park, C. E., *Effects of semiconductor/dielectric interfacial properties on the electrical performance of top-gate organic transistors*, **2014**, Org. Electron. 15 (7), S. 1299–1305, DOI: 10.1016/j.orgel.2014.02.026.
- (Clemens, 2003) Clemens, W.; Fix, W., *Vom organischen Transistor zum Plastik-Chip*, **2003**, Physik Journal 2 (2), S. 31–36.

- (Cobb, 2010) Cobb, B.; Wang, L.; Dunn, L.; Dodabalapur, A., *Velocity-field characteristics of polycrystalline pentacene field-effect transistors*, **2010**, J. Appl. Phys. 107 (12), S. 124503, DOI: 10.1063/1.3374707.
- (Coropceanu, 2007) Coropceanu, V.; Cornil, J.; da Silva Filho, D. A.; Olivier, Y.; Silbey, R.; Bredas, J.-L., *Charge transport in organic semiconductors*, **2007**, Chemical reviews 107 (4), S. 926-952, DOI: 10.1021/cr050140x.
- (Dodabalpur, 1995) Dodabalapur, A.; Torsi, L.; Katz, H. E., *Two-Dimensional Transport and Improved Electrical Characteristics*, **1995**, Science, 268, S. 270–271.
- (Dost, 2007) Dost, R.; Das, A.; Grell, M.; *A novel characterization scheme for organic field-effect transistors*, **2007**, J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (12), S. 3563–3566, DOI: 10.1088/0022-3727/40/12/003.
- (Dost, 2008) Dost, R.; Das, A.; Grell, M., *Time-of-flight mobility measurements in organic field-effect transistors*, **2008**, J. Appl. Phys. (104), S. 84519, DOI: 10.1063/1.3006443.
- (Dunn, 2006) Dunn, L.; Basu, D.; Wang, L.; Dodabalapur, A.; *Organic field effect transistor mobility from transient response analysis*, **2006**, Appl. Phys. Lett. (88), S. 63507. DOI: 10.1063/1.2172023.
- (Dunn, 2009) Dunn, L.; Cobb, B.; Reddy, D.; Dodabalapur, A., *Dynamic characterization of charge transport in organic and polymer transistors*, **2009**, Appl. Phys. A 95 (1), S. 153–158. DOI: 10.1007/s00339-008-5059-0.
- (Dunn, 2010) Dunn, L.; Dodabalapur, A., *Temperature dependent transient velocity and mobility studies in an organic field effect transistor*, **2010**, J. Appl. Phys. 107 (11), S. 113714. DOI: 10.1063/1.3415546.
- (Dykes, 1999) Dykes, Y.; *Flexography: Principles & Practices*, **1999**, 5. Aufl., New York: Foundation of Flexographic Technical Association, Inc (Volume 4).
- (Facchetti, 2005) Facchetti, A.; Yoon, M.-H.; Marks, T. J., *Gate Dielectrics for Organic Field-Effect Transistors, New Opportunities for Organic Electronics*, **2005**, Adv. Mater. 17 (14), S. 1705-1725, DOI: 10.1002/adma.200500517.
- (Facchetti, 2007) Facchetti, A., *Semiconductors for organic transistors*, **2007**, Materials Today 10 (3), S. 28–37, DOI: 10.1016/S1369-7021(07)70017-2.

- (Felderhoff, 2007) Felderhoff, R.; Freyer, U., *Elektrische und elektronische Messtechnik*, **2007**, 8. aktualisierte Aufl., Hanser (Lernbücher der Technik), München.
- (Fukuda, 2014) Fukuda, K.; Takeda, Y.; Mizukami, M.; Kumaki, D.; Tokito, S., *Fully solution-processed flexible organic thin film transistor arrays with high mobility and exceptional uniformity*, **2014**, Sci. Rep. 4, S. 3947, DOI: 10.1038/srep03947.
- (Fukuda, 2016) Fukuda, K.; Someya, T., *Recent Progress in the Development of Printed Thin-Film Transistors and Circuits with High-Resolution Printing Technology*, **2016**, Adv. Mater. 29 (25), S- 1521-4095, DOI: 10.1002/adma.201602736.
- (Ganz, 2013a) Ganz, S.; Pankalla, S.; Glesner, M.; Dörsam, E., *Process dependent leakage currents in printed organic dielectric layers*, **2013**, Proceedings of International Conference on Organic Electronics ICOE 2013, Grenoble, 17.-20.06.2013.
- (Ganz, 2013b) Ganz, S.; Pankalla, S.; Sauer, H. M.; Glesner, M.; Dörsam, E., *Printing technique dependent charge carrier velocity distribution in organic thin film transistors*, **2013**, Proceedings of SPIE Optics+Photonics, San Diego, CA, USA, 16.-29.08.2013, Vol. 8831 (88314-1), DOI: 10.1117/12.2023244.
- (Ganz, 2016) Ganz, S.; Sauer, H. M.; Weißenseel, S.; Zembron, J.; Tone, R.; Dörsam, E., *Printing and Processing Techniques*, In: Nisato, Lupo und Ganz (Hg.): Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications, **2016**, Pan Stanford Publishing, Singapur, S. 48–116, ISBN: 978-981-4669-74-0.
- (Gburek, 2010) Gburek, B.; Wagner, V., *Influence of the semiconductor thickness on the charge carrier mobility in P3HT organic field-effect transistors in top-gate architecture on flexible substrates*, **2010**, Org. Electron. 11 (5), S. 814–819, DOI: 10.1016/j.orgel.2010.01.023.
- (Gershenson, 2006) Gershenson, M. E.; Podzorov, V.; Morpurgo, A. F., *Electronic transport in single-crystal organic transistors*, **2006**, Rev. Mod. Phys. 78 (3), S. 973–989, DOI: 10.1103/RevModPhys.78.973.
- (Gomes, 2016) Gomes, H. L.; *Organic Field-Effect Transistors*, In: Nisato, Lupo und Ganz (Hg.): Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications, **2016**, Pan Stanford Publishing, Singapur, S. 147–198, ISBN: 978-981-4669-74-0.
- (Grau, 2016) Grau, G.; Subramanian, V., *Fully High-Speed Gravure Printed, Low-Variability, High-Performance Organic Polymer Transistors with Sub-5 V Operation*, **2016**, Adv. Electron. Mater. 2 (4), S. 1500328, DOI: 10.1002/aelm.201500328.

- (GEF, 2003) Gravure Education Foundation; Gravure Association of America, *Gravure: Process and Technology*, **2003**, New York: Gravure Education Foundation and Gravure Association of America, ISBN: 1-880-29000-6.
- (Ha, 2012) Ha, T.-J.; Sonar, P.; Dodabalapur, A., *Charge carrier velocity distributions in high mobility polymer field-effect transistors*, **2012**, Appl. Phys. Lett. 100 (15), S. 153302. DOI: 10.1063/1.3697994.
- (Hassinen, 2013) Hassinen, T.; Sandberg, H. G. O., *Gravure printed low voltage polymer transistors and inverters*, **2013**, Thin Solid Films 548, S. 585–589. DOI: 10.1016/j.tsf.2013.09.070.
- (Hengen, 2015) Hengen, S., *Analyse und Simulation parasitärer Effekt in flüssig prozessierten organischen Transistoren*, **2015**, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Online verfügbar <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000046032>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.
- (Hernandez-Sosa, 2013) Hernandez-Sosa, G.; Bornemann, N.; Ringle, I.; Agari, M.; Dörsam, E.; Mechau, N.; Lemmer, U., *Rheological and Drying Considerations for Uniformly Gravure-Printed Layers: Towards Large-Area Flexible Organic Light-Emitting Diodes*, **2013**, Adv. Funct. Mater., DOI: 10.1002/adfm.201202862.
- (Heo, 2014) Heo, J. H.; Song, D. H.; Im, S. H., *Planar CH₃NH₃PbBr₃ hybrid solar cells with 10.4% power conversion efficiency, fabricated by controlled crystallization in the spin-coating process*, **2014**, Adv. Mat. 26 (48), S. 8179–8183, DOI: 10.1002/adma.201403140.
- (Höfle, 2014) Höfle, S.; *Flüssigprozessierte organische Tandem-Leuchtdioden*, **2014**, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Online verfügbar unter <https://www.ksp.kit.edu/9783731503279>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.
- (Horowitz, 2004) Horowitz, G.; *Organic thin film transistors: From theory to real devices*, **2004**, J. Mater. Res. 19 (07), S. 1946–1962, DOI: 10.1557/JMR.2004.0266.
- (Horowitz, 2007) Horowitz, G.; *Charge Transport in Oligomers*, In: Bao und Locklin (Hg.): *Organic field-effect transistors (Optical science and engineering series)*, **2007**, Taylor & Francis, Boca Raton S. 73–101, ISBN: 978-0849380808.
- (Horowitz, 2009) Horowitz, G.; *Organic Transistors*, In: Klauk (Hg.): *Organic electronics. Materials, manufacturing and applications*, 1. ed., 2. Repr, **2009**, Wiley-VCH, Weinheim, S. 3-31, ISBN: 3-527-31264-1.
- (IUPAC, 2014) IUPAC, *IUPAC Gold Book*, **2014**, Online verfügbar unter <https://goldbook.iupac.org/pdf/goldbook.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.

- (Kang, 2014) Kang, H.; Kitsomboonloha, R.; Ulmer, K.; Stecker, L.; Grau, G.; Jang, J.; Subramanian, V., *Megahertz-class printed high mobility organic thin-film transistors and inverters on plastic using attoliter-scale high-speed gravure-printed sub-5 μ m gate electrodes*, **2014**, Org. Electron. 15 (12), S. 3639–3647. DOI: 10.1016/j.orgel.2014.10.005.
- (Kano, 2011) Kano, M.; Minari, T.; Tsukagoshi, K.; Maeda, H.; *Control of device parameters by active layer thickness in organic field-effect transistors*, **2011**, Appl. Phys. Lett. 98 (7), S. 73307, DOI: 10.1063/1.3555463.
- (Kim, 2016) Kim, J.; Hassinen, T.; Lee, W. H.; Ko, S.; *Fully solution-processed organic thin-film transistors by consecutive roll-to-roll gravure printing*, **2016**, Org. Electron., DOI: 10.1016/j.orgel.2016.12.061.
- (Kipphan, 2001) Kipphan, H., *Handbook of Print Media - Technologies and Production Methods*, **2001**, Springer, Heidelberg Online verfügbar unter <http://www.springer.com/engineering/mechanical+engineering/book/978-3-540-67326-2>, zuletzt geprüft am 18.03.2014.
- (Klauk, 2009) Klauk, H. (Hg.), *Organic electronics, Materials, manufacturing and applications*. 1. ed., 2. Repr, **2009**: Wiley-VCH, Weinheim, ISBN: 3-527-31264-1.
- (Köhler, 2015) Köhler, A.; Bässler, H., *Electronic Processes in Organic Semiconductors*, **2015**, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN: 978-3-527-33292-2.
- (Krüss, 2017) Krüss GmbH, *Glossar*, Online verfügbar unter <https://www.kruss.de/de/service/schulung-theorie/glossar/>, zuletzt geprüft am 15.05.2017.
- (Kushida, 2014) Kushida, T.; Nagase, T.; Naito, H., *Angular distribution of field-effect mobility in oriented poly[5,5'-bis(3-dodecyl-2-thienyl)-2,2'-bithiophene] fabricated by roll-transfer printing*, **2014**, Appl. Phys. Lett. 104 (9), S. 93304. DOI: 10.1063/1.4867980.
- (Kymissis, 2001) Kymissis, I.; Dimitrakopoulos, C. D.; Purushothaman, S., *High-performance bottom electrode organic thin-film transistors*, **2001**, IEEE Trans. Electron Devices 48 (6), S. 1060-1064. DOI: 10.1109/16.925226.
- (Lechner, 2014) Lechner, M. D.; Gehrke, K.; Nordmeier, E. H., *Makromolekulare Chemie, Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker*, **2014**, 5th ed., Springer, Berlin, ISBN: 978-3-642-41768-9.

- (Lee, 2011) Lee, C.-G.; Cobb, B.; Ferlauto, L.; Dodabalapur, A., *Charge carrier velocity distributions in field-effect transistors*, **2011**, Appl. Phys. Lett. 98 (9), S. 92106. DOI: 10.1063/1.3558910.
- (Leo, 2017) Leo, Karl, *orgworld.de*. Hg. v. Institut für angewandte Photophysik, Technische Universität Dresden, Online verfügbar unter www.orgworld.de, zuletzt geprüft am 24.03.2017.
- (Merck, 2011) Baden, W., *Merck Chemikalien und Reagenzien - Katalog 2011-2013*, **2011**.
- (Moore, 1998) Moore, G. E., *Cramming More Components Onto Integrated Circuits*, **1998**, Proc. IEEE 86 (1), S. 82–85, DOI: 10.1109/JPROC.1998.658762.
- (Nisato, 2016) Nisato, G.; Lupo, D.; Ganz, S. (Hg.), *Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications*, **2016**, Pan Stanford Publishing, Singapur, ISBN: 978-981-4669-74-0.
- (Oelerich, 2012) Oelerich, J. O., *Theoretical discription of charge transportin Organic Semiconductors*, **2012**, Masterthesis, Philipps-Universität Marburg, Marburg.
- (Oelerich, 2015) Oelerich, J. O., *Theoretical Modelinf of Kinetic Phenomena of Atoms and Charge Carriers in Disordered Materials*, **2015**, Dissertation, Philipps-Universität Marburg, Marburg.
- (Okamura, 2009) Okamura, K.; Nikolova, D.; Mechau, N.; Hahn, H., *Appropriate choice of channel ratio in thin-film transistors for the exact determination of field-effect mobility*, **2009**, Appl. Phys. Lett. 94 (18), S. 183503, DOI: 10.1063/1.3126956.
- (Pankalla, 2012a) Pankalla, S.; Spiehl, D.; Dörsam, E.; Glesner, M., *Variation of electrical parameters of organic thin film transistors as a function of semiconductros layers thickness*, **2012**, 2nd Winter School of Organic Electronics, Heidelberg.
- (Pankalla, 2012b) Pankalla, S.; Hengen, S.; Haas, C., *CSV_Import_UserForm*, Ein Excel-Makro zur Extraktion von Transistorparametern, **2012**.
- (Pankalla, 2013a) Pankalla, S.; Spiehl, D.; Sauer, H. M.; Dörsam, E.; Glesner, M., *Improved contact resistivity and intra-die variation in organic thin film transistors*, **2013**, Appl. Phys. Lett. 102 (17), S. 173303. DOI: 10.1063/1.4804239.
- (Pankalla, 2013b) Pankalla, S.; Ganz, S.; Spiehl, D.; Dörsam, E.; Glesner, M., *Organic thin-film transistors for circuits in a foundry: process, charge transport phenomena and device library*, **2013**,

- Proceedings of SPIE Optics+Photonics, San Diego, CA, USA, 16.-29.08.2013, Vol. 8831, S. 88310. DOI: 10.1117/12.2023011.
- (Pankalla, 2014) Pankalla, S., *Modellierung der technologiebasierten Einflüsse auf das Bauteilverhalten gedruckter organischer Transistoren*, **2014**, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, tprints: <http://tprints.ulb.tu-darmstadt.de/4040/>.
- (Panzer, 2007) Panzer, M. J.; Frisbie, C. D., *Contact Effects in Organic Field-Effect Transistors*, In: Bao und Locklin (Hg.): *Organic field-effect transistors (Optical science and engineering series)*, **2007**, Taylor & Francis, Boca Raton, S. 139–157, ISBN: 978-0849380808.
- (Park, 2007) Park, Y. D.; Lim, J. A.; Lee, H.S.; Cho, K., *Interface engineering in organic transistors*, **2007**, Mater. Today 10 (3), S. 46–54, DOI: 10.1016/S1369-7021(07)70019-6.
- (Perelaer, 2010) Perelaer, J.; Smith, P. J.; Mager, D.; Soltman, D.; Volkman, S. K.; Subramanian, V.; Korvink, J.G.; Schubert, U. S.; *Printed electronics, The challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials*, **2010**, J. Mater. Chem. 20 (39), S. 8446, DOI: 10.1039/c0jm00264j.
- (POLYTOS, 2013) POLYTOS II, *Schlussbericht zum Verbundprojekt "Gedruckte organische Schaltungen und Speicher, Phase 2 (POLYTOS2)"*, **2013**, TIB.
- (Radkhah, 2015) Radkhah, R., *Validierung eines Messverfahrens zur Charakterisierung der Akkumulationsschicht in gedruckten OFETs*, **2015**, Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- (Ranfeld, 2015) Ranfeld, C., *Wet etching of printed silver layers using an etch resist structured by flexography*, **2015**, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, tprints: <http://tprints.ulb.tu-darmstadt.de/4534/>.
- (Raupp, 2017) Raupp, S.; Daume, D.; Tekoglu, S.; Merklein, L.; Lemmer, U.; Hernandez-Sosa, G.; Sauer, H.M.; Dörsam, E.; Scharfer, P.; Schabel, W., *Slot Die Coated and Flexo Printed Highly Efficient SMOLEDs*, **2017**, Adv. Mater. Technol. 2 (2), S. 1600230, DOI: 10.1002/admt.201600230.
- (Riedel, 2004) Riedel, E., *Anorganische Chemie*, **2004**, 6. Auflage: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, ISBN: 3-11-0181168-1.
- (Ruiz, 2005) Ruiz, R.; Papadimitratos, A.; Mayer, A. C.; Malliaras, G. G., *Thickness Dependence of Mobility in Pentacene Thin-Film Transistors*, **2005**, Adv. Mater. 17 (14), S. 1795–1798, DOI: 10.1002/adma.200402077.

- (Ryu, 2014) Ryu, S.; Noh, J. H.; Jeon, N. J.; Chan Kim, Y.; Yang, W. S.; Seo, J.; Seok, S. I., *Voltage output of efficient perovskite solar cells with high open-circuit voltage and fill factor*, **2014**, Energy Environ. Sci. 7 (8), S. 2614, DOI: 10.1039/C4EE00762J.
- (Salleo, 2009) Salleo, A.; Chabinyc, M. L., *Electrical and Environmental Stability of Polymer Thin-fil Transistors*, In: Klauk (Hg.): Organic electronics. Materials, manufacturing and applications, **2009**, 1. ed., 2. Repr, Wiley-VCH, Weinheim, S. 108-131, ISBN: 3-527-31264-1.
- (Sandberg, 2002) Sandberg, H. G. O.; Frey, G. L.; Shkunov, M. N.; Sirringhaus, H.; Friend, R. H.; Nielsen, M. M.; Kumpf, C., *Ultrathin Regioregular Poly(3-hexyl thiophene) Field-Effect Transistors*, **2002**, Langmuir 18 (26), S. 10176–10182. DOI: 10.1021/la0261444.
- (Sauer, 2015) Sauer, H. M., *Herleitung einer Formel zur Berechnung der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung in elektronischen TOF-Messungen*, handschriftliche Ausarbeitung, **2015**.
- (Schulenburg, 2004) Schulenburg, M., *Vom Sand zum Superchip*, **2004**, Forschungsbericht des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Online verfügbar unter: http://www.invent-a-chip.de/invent-a-chip/infos%20und%20tipps/documents/vom_sand_zum_superchip.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2017.
- (Shenkman, 2005) Shenkman, A.L., *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook*, **2005**, Springer, Dordrecht, Niederlande, ISBN: 13 078-0-387-28799-7.
- (Shi, 2016) Shi, X.-H.; Sun, J.-X.; Xiong, C.-H.; Le Sun, *Exponential-type density of states with clearly cutting tail for organic semiconductors*, **2016**, Org. Electron. 30, S. 60–66, DOI: 10.1016/j.orgel.2015.11.023.
- (Sirringhaus, 2000) Sirringhaus, H.; Kawase, T.; Friend, R. H.; Shimoda, T.; Inbasekaran, M.; Wu, W.; Woo, E. P., *High-Resolution Inkjet Printing of All-Polymer Transistor Circuits*, **2000**, Science (290), S. 2123–2126.
- (Sirringhaus, 2005) Sirringhaus, H., *Device Physics of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors*, **2005**, Adv. Mater. 17 (20), S. 2411–2425, DOI: 10.1002/adma.200501152.
- (Sirringhaus, 2007) Sirringhaus, H., *Charge Transport Physics of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors*, In: Bao und Locklin (Hg.): Organic field-effect transistors (Optical science and engineering series), **2007**, Taylor & Francis, Boca Raton, S. 103–137, ISBN: 978-0849380808.

- (Sirringhaus, 2014) Sirringhaus, H., *25th anniversary article: organic field-effect transistors: the path beyond amorphous silicon*, **2014**, Adv. Mat. 26 (9), S. 1319–1335. DOI: 10.1002/adma.201304346.
- (Spiehl, 2012) Spiehl, D.; Pankalla, S.; Glesner, M.; Doersam, E., *Analysis of the mobility of printed organic p-channel transistors depending on the transistor geometry and orientation*, **2012**, J. Phys.: Conf. Ser. 345, S. 12013, DOI: 10.1088/1742-6596/345/1/012013.
- (Stiftinger, 1994) Stiftinger, M., *Subthreshold-Kennlinie*, **1994**, Online verfügbar unter <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/pimingstorfer/node41.html>, zuletzt geprüft am 06.06.2017.
- (Stillwagon, 1992) Stillwagon, L. E.; Larson, R. G., *Planarization during spin coating*, **1992**, Phys. Fluids A 4 (5), S. 895, DOI: 10.1063/1.858269.
- (Stiny, 2012) Stiny, L., *Elektrotechnik für Studierende: Band 1 - Grundlagen*, Leseproben für 1. Aufl., ISBN: 978-3-86522-685-3, Online verfügbar unter <http://www.stiny-leonhard.de/lesprob6.pdf>, zuletzt geprüft am 13.06.2017.
- (Theopold, 2014) Theopold, A., *Charakterisierung von Flexodruckformen hinsichtlich der Eignung für die gedruckte Elektronik*, **2014**, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Books on Demand.
- (Tiwari, 2009) Tiwari, S.; Greenham, N. C., *Charge mobility measurement techniques in organic semiconductors*, **2009**, Opt. Quant. Electron. 41 (2), S. 69–89, DOI: 10.1007/s11082-009-9323-0.
- (Tone, 2016) Tone, R.; Ganz, S., *Characterization Techniques for Printed Electronics*, In: Nisato, Lupo und Ganz (Hg.): *Organic and Printed Electronics: Fundamentals and Applications*, **2016**, Pan Stanford Publishing, Singapur, S. 117–146, ISBN: 978-981-4669-74-0.
- (Trollmann, 2014) Trollmann, J., *Infrarot-Ellipsometrie-Untersuchungen zum Einfluss von Wärme und Feuchte auf organischer Halbleiter sowie zum Einfluss der Morphologie von Goldfilmen auf ihr dielektrische Funktion*, Dissertation, **2014**, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Online verfügbar unter <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/17844/>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.
- (Tsumura, 1986) Tsumura, A.; Koezuka, H.; Ando, T., *Macromolecular electronic device, Field-effect transistor with a polythiophene thin film*, **1986**, Appl. Phys. Lett. 49 (18), S. 1210–1212, DOI: 10.1063/1.97417.

- (Verilhac, 2009) Verilhac, J. M.; Benwadih, M.; Altazin, S.; Jacob, S.; Gwoziecki, R.; Coppard, R.; Serbutoviez, C., *Effects of amorphous semiconductor thickness on top gate staggered organic field-effect transistors*, **2009**, Appl. Phys. Lett. 94 (14), S. 143301, DOI: 10.1063/1.3111446.
- (Vilkman, 2015) Vilkman, M.; Hassinen, T.; Keränen, M.; Pretot, R.; van der Schaaf, P.; Ruotsalainen, T.; Sandberg, H. G. O., *Fully roll-to-roll processed organic top gate transistors using a printable etchant for bottom electrode patterning*, **2015**, Org. Electron. 20, S. 8–14, DOI: 10.1016/j.orgel.2015.01.031.
- (Vissenberg, 1998) Vissenberg, M. C. J. M.; Matters, M., *Theory of the field-effect mobility in amorphous organic transistors*, **1998**, Phys. Rev. B 57, S. 12964–12967.
- (Wang, 2004) Wang, G.; Hirasa, T.; Moses, D.; Heeger, A. J., *Fabrication of regioregular poly(3-hexylthiophene) field-effect transistors by dip-coating*, **2004**, Synth. Met. 146 (2), S. 127–132, DOI: 10.1016/j.synthmet.2004.06.026.
- (Watcharinyanon, 2008) Watcharinyanon, Somsakul, *Structure of self-assembled monolayers on gold studied by NEXAFS and photoelectron spectroscopy*, **2008**, Dissertation, Universität Karlsruh, Karlsruh University studies, Online verfügar unter <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:25339/FULLTEXT01.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.
- (Weidinger, 2003) Weidinger, I. M., *Untersuchungen zum Gefrierverhalten Levitierter n-Alkan Mikrotropfen*, **2003**, Dissertation, Freie Universität Berlin, Online verfügar unter http://www.diss.fu-berlin.de/diss/receive/FUDISS_thesis_000000000992, zuletzt geprüft am 30.07.2017.
- (Weis, 2009) Weis, M.; Lin, J.; Taguchi, D.; Manaka, T.; Iwamoto, M., *Analysis of Transient Currents in Organic Field Effect Transistor, The Time-of-Flight Method*, **2009**, J. Phys. Chem. C 113 (43), S. 18459–18461. DOI: 10.1021/jp908381b.
- (Wierzchowiec, 2016) Piotr Wierzchowiec, *Fully Printed Thin Film Transistors, With Merck's High Performance Organic Semiconductors and Dielectrics*, **2016**, LOPE-C, Technical Conference, München, 06.04.2016.
- (Xu, 2008) Xu, M.; Nakamura, M.; Kudo, K., *Thickness dependence of mobility of pentacene planar bottom-contact organic thin-film transistors*, **2008**, Thin Solid Films 516 (9), S. 2776–2778. DOI: 10.1016/j.tsf.2007.04.115.

-
- (Zhang, 2009) Zhang, W.; Smith, J.; Hamilton, R.; Heeney, M.; Kirkpatrick, J.; Song, K.; Watkins, S. E.; Anthopoulos, T.; McCulloch, I., *Systematic improvement in charge carrier mobility of air stable triarylamine copolymers*, **2009**, Journal of the American Chemical Society 131 (31), S. 10814–10815, DOI: 10.1021/ja9034818.

Betreute Arbeiten

Ricklefs, Niels: *Prozessieren von Self-Assembled Monolayers: Microcontact Printing und Alternativen*, Forschungsseminar, 2012.

Stoll, Jonas: *Microcontact Printing von SAMs: Druckvorschriften und Stempelherstellung*, Forschungsseminar, 2012.

Czwick, Stephan: *Gedruckte Energiespeicher – Gedruckte Batterien und Akkumulatoren*, Forschungsseminar, 2104.

Spiegel, Lucas: *Metall-Luft-Zellen – Stand der Technik neuer Akkumulatoren*, Forschungsseminar, 2014.

Zembron, Julian: *Beschichtungstechniken in der Batterieproduktion*, Forschungsseminar, 2014.

Fulek, Anke: *Hochgeschwindigkeitstemperaturmessung*, Forschungsseminar, 2014.

Radkhah, Ramtin: *Validierung eines Messverfahrens zur Charakterisierung der Akkumulationsschicht in gedruckten OFETs*, Bachelor Thesis, 2015.

Vorwerk-Handing, Gunnar: *Gedruckte Leiterbahnen – Materialien und Verfahren*, Forschungsseminar, 2015.

Jisu, Yoon: *Organische Feldeffekttransistoren – Beschichtungstechnologien und Performance für polymere p-Halbleiter*, Forschungsseminar, 2016.

Fulek, Anke: *Gedruckte Polymerschichten als Dielektrika in Kondensatoren: Prozessentwicklung und Analyse*, Master Thesis, 2016.

Bechtold, Moritz: *Plasma- und Korona-Behandlung: Vergleichende Untersuchung der Oberflächenmodifizierung von Folien und Glassubstraten*, Bachelor Thesis, 2017.

Eigene Veröffentlichungen

Giovanni Nisato, Donald Lupo, Simone Ganz, *Introduction to Organic and Printed Electronics*, in Giovanni Nisato, Donald Lupo, Simone Ganz, *Organic and Printed Electronics - Fundamentals and Applications*, Lehrbuch erschienen bei Pan Stanford, Singapur, **2016**, ISBN 9814669741, S. 1-9.

Simone Ganz, Hans Martin Sauer, Robert Tone, Simon Weißenseel, Edgar Dörsam, Moritz Schaefer, Malte Schulz-Ruthenberg, *Printing and Processing Techniques*, in Giovanni Nisato, Donald Lupo, Simone Ganz, *Organic and Printed Electronics - Fundamentals and Applications*, Lehrbuch erschienen bei Pan Stanford, Singapur, **2016**, ISBN 9814669741, S. 47-116.

Robert Tone, Simone Ganz, *Characterization Techniques for Printed Electronics*, in Giovanni Nisato, Donald Lupo, Simone Ganz, *Organic and Printed Electronics - Fundamentals and Applications*, Lehrbuch erschienen bei Pan Stanford, Singapur, **2016**, ISBN 9814669741, S. 117-146.

Simone Ganz, Sebastian Pankalla, Hans Martin Sauer, Manfred Glesner, Edgar Dörsam, *Printing technique dependent charge carrier velocity distribution in organic thin film transistors*, Graduate Seminar in Organic and Printed Electronics **2013**, Tampere University of Technology - Department of Electronics.

Sebastian Pankalla, Simone Ganz, Dieter Spiehl, Edgar Dörsam, Manfred Glesner, *Organic thin-film transistors for circuits in a foundry: process, charge transport phenomena and device library*, Proceedings of SPIE Optics&Photonics **2013**, San Diego, CA, USA, 16.-29.08.2013, doi: 10.1117/12.2023011.

Simone Ganz, Sebastian Pankalla, Hans Martin Sauer, Manfred Glesner, Edgar Dörsam, *Printing technique dependent charge carrier velocity distribution in organic thin film transistors*, Proceedings of SPIE Optics&Photonics **2013**, San Diego, CA, USA, 16.-29.08.2013, doi: 10.1117/12.2023244.

Simone Ganz, Sebastian Pankalla, Manfred Glesner, Edgar Dörsam, *Process dependent leakage currents in printed organic dielectric layers*, International Conference on Organic Electronics (ICOE), **2013**, Grenoble, France.

A. Anhang

A.1. Mobilität und Schwellspannung der ausgewählten Transistoren

0358		28	34	36	38	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0167	0,0161	0,0165	0,0164	0,0164	0,0002
$ V_t $	V	5,38	5,62	6,25	6,04	5,82	0,34
0359		22	26	28	32	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0155	0,0155	0,0156	0,0151	0,0154	0,0002
$ V_t $	V	4,61	4,82	5,33	4,86	4,91	0,26
0360		22	24	26	32	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0151	0,0146	0,0148	0,0146	0,0148	0,0002
$ V_t $	V	4,19	4,32	4,08	4,07	4,17	0,10
0361		28	34	36	38	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0172	0,0161	0,0138	0,0158	0,0157	0,0012
$ V_t $	V	4,27	4,15	3,72	4,09	4,06	0,21
0362		24	26	28	36	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0196	0,0197	0,0197	0,0191	0,0195	0,0002
$ V_t $	V	4,49	4,54	4,23	4,19	4,36	0,15
0363		22	26	28	36	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0166	0,0161	0,0168	0,0164	0,0165	0,0003
$ V_t $	V	4,68	5,05	4,85	5,03	4,90	0,15
0385		26	28	36	38	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,028	0,0286	0,0272	0,0293	0,0283	0,0008
$ V_t $	V	8,34	7,81	6,44	7,75	7,59	0,70
0386		22	24	28	34	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0285	0,0284	0,0289	0,0277	0,0284	0,0004
$ V_t $	V	9,44	9,91	9,41	9,47	9,56	0,20
0387		24	26	28	34	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0279	0,0259	0,0276	0,0274	0,0272	0,0008
$ V_t $	V	7,6	6,19	7,33	6,68	6,95	0,55
0388		22	24	28	36	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0253	0,0262	0,0272	0,026	0,0262	0,0007
$ V_t $	V	6,86	6,94	7,07	6,78	6,91	0,11
0389		22	24	26	32	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0281	0,0284	0,0282	0,0286	0,0283	0,0002
$ V_t $	V	5,36	6,61	6,67	5,08	5,93	0,72
0390		22	26	28	36	Mittelwert	σ
μ	cm^2/Vs	0,0286	0,0281	0,0283	0,0276	0,0282	0,0004
$ V_t $	V	5,07	5,83	5,35	5,26	5,38	0,28

0424	24	26	28	/	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0265	0,0243	/	/	0,0254	0,0011
$ V_t $ V	5,85	4,32	/	/	5,09	0,77
0425	24	26	28	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0221	0,0224	0,0226	0,0218	0,0222	0,0003
$ V_t $ V	4,13	4,37	3,91	2,88	3,82	0,57
0426	24	26	32	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,02	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0000
$ V_t $ V	2,68	2,89	2,52	2,41	2,63	0,18
0430	22	24	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0183	0,0188	0,0141	0,0169	0,0170	0,0018
$ V_t $ V	1,20	1,53	1,64	2,03	1,60	0,30
0431	22	32	36	/	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0156	0,0167	0,0146	/	0,0156	0,0009
$ V_t $ V	1,64	1,54	1,88	/	1,69	0,14
0432	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,019	0,0206	0,0203	0,0205	0,0201	0,0006
$ V_t $ V	8,27	8,37	8,03	7,825	8,12	0,21
0433	24	26	28	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,021	0,0205	0,0212	0,0498	0,0281	0,0125
$ V_t $ V	9,17	9,35	8,09	1,01	6,91	3,44
0434	24	26	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0204	0,0216	0,0208	0,0213	0,0210	0,0005
$ V_t $ V	7,58	8,38	6,22	6,27	7,11	0,91
0435	24	28	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0186	0,0186	0,0196	0,02	0,0192	0,0006
$ V_t $ V	8,45	7,24	5,46	5,93	6,77	1,17
0436	22	28	32	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0225	0,0213	0,0219	0,0202	0,0215	0,0008
$ V_t $ V	7,51	7,64	6,68	6,36	7,05	0,54
0437	22	24	26	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0215	0,0216	0,0218	0,0214	0,0216	0,0001
$ V_t $ V	7,27	9,27	8,72	6,22	7,87	1,20
0438	22	24	26	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0221	0,0221	0,0219	0,0213	0,0219	0,0003
$ V_t $ V	8,27	8,61	9,04	7,04	8,24	0,74
0439	22	26	32	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0221	0,0221	0,0215	0,0215	0,0218	0,0003
$ V_t $ V	7,95	9,14	7,39	7,35	7,96	0,72

0440	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0222	0,0219	0,0216	0,0217	0,0219	0,0002
V _t V	7,76	8,26	7,35	7,77	7,79	0,32
0441	22	32	34	38	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,02	0,0205	0,0197	0,0205	0,0202	0,0003
V _t V	6,07	6,18	7,04	6,49	6,45	0,38
0442	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0211	0,0214	0,0217	0,0212	0,0214	0,0002
V _t V	7,35	7,39	7,85	7,4	7,50	0,20
0443	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0203	0,0199	0,0211	0,0205	0,0205	0,0004
V _t V	7,22	6,75	7,62	7,12	7,18	0,31
0444	24	38	32	34	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0172	0,0187	0,0183	0,018	0,0181	0,0006
V _t V	4,7	4,22	3,51	3,93	4,09	0,43
0445	22	34	36	38	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0185	0,0176	0,0178	0,0187	0,0182	0,0005
V _t V	4,52	4,7	5,1	5,29	4,90	0,31
0446	24	26	28	32	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,02	0,0197	0,0194	0,0192	0,0196	0,0003
V _t V	6,09	5,98	5,67	4,93	5,67	0,45
0447	22	24	28	34	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0195	0,0191	0,0201	0,0179	0,0192	0,0008
V _t V	5,6	5,81	6,14	5	5,64	0,42
0448	24	26	28	38	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0194	0,0201	0,0196	0,0196	0,0197	0,0003
V _t V	7,11	7,11	6,13	6,15	6,63	0,49
0449	26	28	32	36	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,0192	0,0197	0,0191	0,0187	0,0192	0,0004
V _t V	7,2	6,79	5,83	5,81	6,41	0,61
0450	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,02	0,0198	0,0194	0,0198	0,0198	0,0002
V _t V	6,27	7,29	6,62	6,01	6,55	0,48
0451	22	24	32	34	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,387	0,381	0,379	0,389	0,384	0,004
V _t V	8,19	9,71	8,25	1,03	6,80	3,38
0452	22	24	32	34	Mittelwert	σ
μ cm ² /Vs	0,368	0,357	0,365	0,352	0,361	0,006
V _t V	9,11	9,77	8,47	9,25	9,15	0,46

0453	22	32	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,427	0,422	0,399	0,417	0,416	0,011
$ V_t $ V	9,73	8,13	6,67	7,3	7,96	1,15
0454	22	24	32	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,42	0,417	0,423	0,429	0,422	0,004
$ V_t $ V	7,51	7,88	7,07	7,34	7,45	0,29
0455	22	24	26	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,405	0,404	0,427	0,423	0,415	0,010
$ V_t $ V	7,22	8,11	9,01	7,44	7,95	0,70
0456	24	26	28	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,438	0,432	0,435	0,402	0,427	0,014
$ V_t $ V	9,66	9,52	8,1	7,83	8,78	0,82
0457	22	32	34	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,427	0,439	0,445	0,418	0,432	0,010
$ V_t $ V	6,87	7,22	7,88	6,28	7,06	0,58
0458	28	34	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,422	0,42	0,417	0,41	0,417	0,005
$ V_t $ V	7,32	7,27	6,85	7,18	7,16	0,18
0459	22	28	32	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,428	0,417	0,42	0,422	0,422	0,004
$ V_t $ V	7,88	7,06	6,36	6,48	6,95	0,60
0460	22	26	32	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,433	0,429	0,435	0,431	0,432	0,002
$ V_t $ V	7,57	8,16	6,85	6,84	7,36	0,55
0461	22	24	26	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,391	0,395	0,414	0,417	0,404	0,011
$ V_t $ V	7,05	7,81	7,53	5,95	7,09	0,71
0462	22	24	32	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,383	0,403	0,385	0,406	0,394	0,010
$ V_t $ V	7,46	8,68	6,34	6,68	7,29	0,90
0464	22	26	32	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,405	0,399	0,409	0,401	0,404	0,004
$ V_t $ V	7,14	7,35	6,05	6,06	6,65	0,60
0465	24	26	32	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,224	0,206	0,216	0,226	0,218	0,008
$ V_t $ V	4,46	4,69	4,71	4,62	4,62	0,10
0466	24	26	28	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,29	0,296	0,284	0,293	0,291	0,004
$ V_t $ V	3,86	4,15	3,73	4,2	3,99	0,20
0467	24	32	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,339	0,34	0,345	0,345	0,342	0,003
$ V_t $ V	4,43	3,92	4,08	3,98	4,10	0,20

0468	24	26	32	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,36	0,352	0,352	0,362	0,357	0,005
$ V_t $ V	5,27	4,93	4,57	4,43	4,80	0,33
0469	22	26	28	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,339	0,34	0,337	0,34	0,339	0,001
$ V_t $ V	4,61	5,49	5,42	4,39	4,98	0,48
0470	24	26	28	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,356	0,355	0,349	0,359	0,355	0,004
$ V_t $ V	6	6,11	5,68	6,19	6,00	0,19
0471	22	24	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,347	0,348	0,358	0,357	0,353	0,005
$ V_t $ V	5,77	6,43	5,82	5,7	5,93	0,29
0472	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0201	0,0200	0,0201	0,0196	0,0200	0,0002
$ V_t $ V	3,18	3,49	3,57	3,22	3,30	0,14
0473	22	26	28	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0199	0,0204	0,0205	0,0199	0,0202	0,0003
$ V_t $ V	2,88	2,83	3,38	3,38	3,12	0,26
0474	22	24	34	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,327	0,327	0,324	0,326	0,326	0,001
$ V_t $ V	3,90	3,54	3,07	3,50	3,50	0,29
0475	24	26	28	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,338	0,340	0,333	0,340	0,338	0,003
$ V_t $ V	4,07	4,12	3,74	2,87	3,70	0,50
0476	24	32	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0211	0,0215	0,0210	0,0210	0,0212	0,0002
$ V_t $ V	4,88	3,40	3,35	3,36	3,75	0,65
0477	24	26	28	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0207	0,0206	0,0202	0,0201	0,0204	0,0003
$ V_t $ V	4,14	4,32	3,37	3,28	3,78	0,46
0478	26	28	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,355	0,341	0,363	0,350	0,352	0,008
$ V_t $ V	4,75	4,20	4,25	4,28	4,37	0,22
0479	22	28	32	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,331	0,335	0,334	0,334	0,334	0,002
$ V_t $ V	3,76	3,81	3,32	3,58	3,62	0,19
0480	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0236	0,0233	0,0236	0,0235	0,0235	0,0001
$ V_t $ V	5,12	5,47	5,46	5,25	5,33	0,15
0481	22	24	262	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0208	0,0213	0,0216	0,0209	0,0212	0,0003
$ V_t $ V	4,90	5,03	5,02	3,55	4,63	0,62

0482	24	26	32	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,337	0,341	0,338	0,335	0,338	0,002
Vt V	5,24	5,19	4,48	4,42	4,83	0,38
0483	24	26	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,346	0,355	0,357	0,354	0,353	0,004
Vt V	4,94	5,22	4,83	4,03	4,76	0,44
0484	24	34	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0223	0,0209	0,0208	0,0217	0,0214	0,0006
Vt V	7,02	6,25	6,38	5,99	6,41	0,38
0485	22	26	32	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0231	0,0232	0,0230	0,0229	0,0231	0,0001
Vt V	5,89	6,93	5,29	6,22	6,08	0,59
0486	22	24	32	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,337	0,336	0,348	0,351	0,343	0,007
Vt V	6,01	6,51	5,97	6,40	6,22	0,24
0487	24	28	32	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,375	0,370	0,376	0,356	0,369	0,008
Vt V	7,05	6,02	6,26	6,76	6,52	0,40
0488	26	32	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0209	0,0216	0,0214	0,0213	0,0213	0,0003
Vt V	9,19	7,09	7,27	7,36	7,73	0,85
0489	24	26	28	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0212	0,0212	0,0216	0,0210	0,0213	0,0002
Vt V	8,46	8,44	7,95	7,83	8,17	0,28
0490	26	28	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,411	0,417	0,396	0,387	0,403	0,012
Vt V	6,12	5,83	5,68	4,73	5,59	0,52
0491	22	24	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,411	0,400	0,416	0,416	0,411	0,007
Vt V	5,82	5,76	5,05	5,28	5,48	0,32
0492	24	32	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0198	0,0219	0,0215	0,0220	0,0213	0,0009
Vt V	11,900	12,10	13,70	15,00	13,18	1,26
0493	28	32	34	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0227	0,0224	0,0228	0,0215	0,0224	0,0005
Vt V	12,90	11,10	12,80	12,60	12,35	0,73
0494	22	26	32	34	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	/	0,419	0,420	0,416	0,418	0,002
Vt V	/	9,98	9,74	9,74	9,82	0,11
0495	26	32	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,427	0,427	0,426	0,420	0,425	0,003
Vt V	8,83	7,92	7,40	7,24	7,85	0,62

0496	26	28	34	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0139	0,0143	0,0105	0,0142	0,0132	0,0016
$ V_t $ V	1,58	1,46	1,53	1,51	1,52	0,04
0497	24	28	34	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0157	0,0153	0,01	0,0121	0,0133	0,0023
$ V_t $ V	1,18	1,06	1,14	1,05	1,11	0,05
0498	22	24	26	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0208	0,0226	0,0215	0,0206	0,0214	0,0008
$ V_t $ V	8,49	8,36	7,91	1,06	6,46	3,12
0499	22	28	32	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0225	0,0228	0,0224	0,0222	0,0225	0,0002
$ V_t $ V	1,05	1,13	1,03	1,2	1,10	0,07
0500	28	34	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0206	0,0194	0,0192	0,0196	0,0197	0,0005
$ V_t $ V	5,31	4,89	4,53	4,45	4,80	0,34
0501	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0196	0,0193	0,0195	0,0195	0,0195	0,0001
$ V_t $ V	3,4	4,45	4,52	3,66	4,01	0,49
0502	22	26	36	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0216	0,0196	0,0216	0,0222	0,0213	0,0010
$ V_t $ V	7,36	8,79	7,97	7,45	7,89	0,57
0503	22	24	32	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0236	0,0239	0,0234	0,0233	0,0236	0,0002
$ V_t $ V	6,97	7,07	7,02	7,03	7,02	0,04
0504	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0235	0,0253	0,0246	0,0248	0,0246	0,0007
$ V_t $ V	4,4	6,2	5,99	5,93	5,63	0,72
0505	22	24	32	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0269	0,0261	0,0264	0,0263	0,0264	0,0003
$ V_t $ V	5,48	6,08	5,18	5,74	5,62	0,33
0506	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0213	0,0213	0,0218	0,0219	0,0216	0,0003
$ V_t $ V	6,2	6,69	6,45	6,18	6,38	0,21
0507	22	24	28	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,0225	0,0215	0,0221	0,0229	0,0223	0,0005
$ V_t $ V	6,31	6,91	5,75	5,53	6,13	0,54
0525	24	26	28	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,482	0,459	0,404	0,405	0,438	0,034
$ V_t $ V	4,51	4,59	4,61	3,72	4,36	0,37

0526	22	24	28	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,305	0,312	0,338	0,315	0,318	0,012
$ V_t $ V	3,80	4,54	3,77	3,49	3,90	0,39
0527	22	24	26	36	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,589	0,623	0,581	0,632	0,606	0,022
$ V_t $ V	4,50	4,75	4,94	3,56	4,44	0,53
0528	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,553	0,581	0,624	0,519	0,569	0,038
$ V_t $ V	5,06	4,76	4,38	3,98	4,55	0,41
0529	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,631	0,324	0,668	0,589	0,553	0,135
$ V_t $ V	4,89	5,66	5,45	5,59	5,40	0,30
0530	22	24	26	28	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,498	0,540	0,539	0,585	0,541	0,031
$ V_t $ V	5,93	5,39	5,66	5,33	5,58	0,24
0531	24	26	28	32	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,316	0,325	0,301	0,287	0,307	0,014
$ V_t $ V	7,30	7,10	7,00	6,79	7,05	0,18
0531	22	26	28	38	Mittelwert	σ
μ cm^2/Vs	0,329	0,370	0,362	0,330	0,348	0,018
$ V_t $ V	5,28	4,73	4,79	4,94	4,94	0,21

A.2. Verteilungen, Kennwerte und Abweichungsanalysen

Messwiderstand

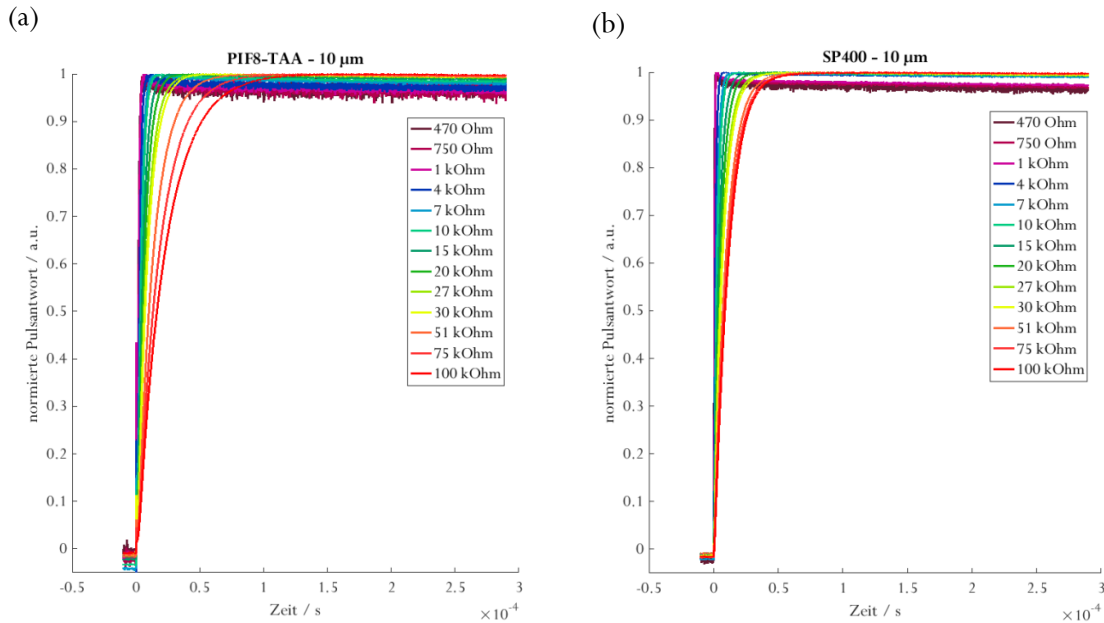


Abbildung A.1: Normierte Pulsantwort in Abhängigkeit des Messwiderstandes für Transistor (a) 0450#31 PIF8-TAA und (b) 0471#27 SP400.

Gate-Spannung

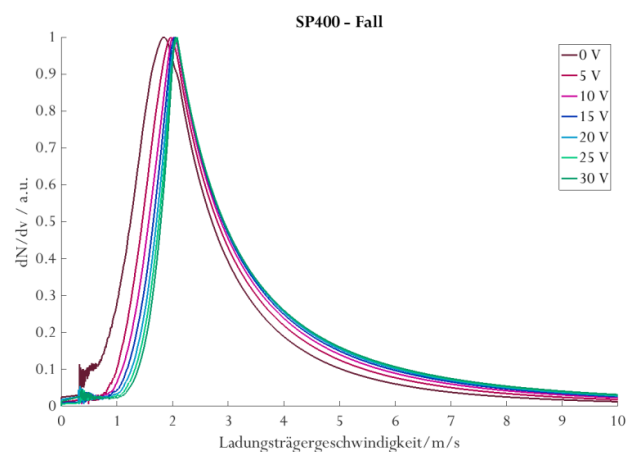


Abbildung A.2: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung des Transistors 0471#24 als Funktion der Gate-Spannung der abfallenden Flanke *Fall*.

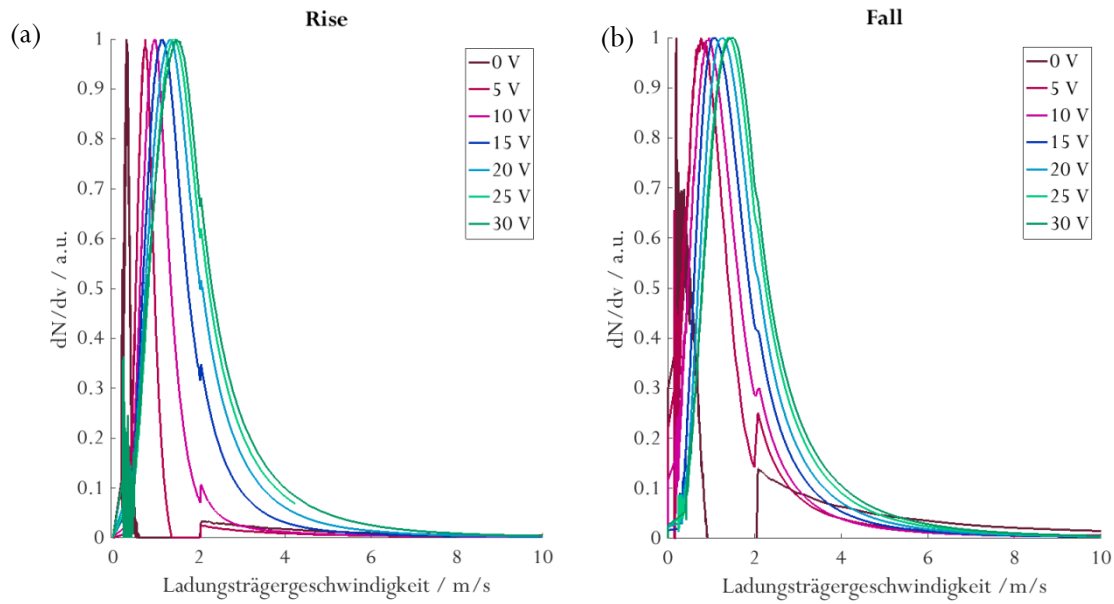


Abbildung A.3: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung des Transistors 0450#24 für die ansteigende Flanke *Rise* (a) und die abfallende Flanke *Fall* (b) als Funktion der Gate-Spannung.

Tabelle A.1: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0471#24 mit 25 μm Kanallänge als Funktion der Gate-Spannung V_g .

V_g	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
0	1,62	7,14	0,87	35	Fronting	8,13E+07	5,3E-06
5	1,89	14,71	1,00	37	Fronting	2,25E+08	3,0E-06
10	2,00	20,83	0,99	39	Fronting	3,92E+08	2,2E-06
15	2,05	25,00	0,96	36	Fronting	5,29E+08	1,8E-06
20	2,05	27,78	0,91	33	Fronting	6,29E+08	1,6E-06
25	2,05	0,52	0,87	30	Fronting	7,07E+08	1,4E-06
30	2,05	31,25	0,85	28	Fronting	7,65E+08	1,3E-06

Tabelle A.2: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0471#27 mit 10 μm Kanallänge als Funktion der Gate-Spannung V_g .

V_g	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
0	0,79	9,09	0,41	35	Fronting	2,29E+08	2,2E-06
5	0,82	14,29	0,38	36	Fronting	5,21E+08	1,7E-06
10	0,82	16,67	0,34	29	Fronting	7,31E+08	1,3E-06
15	0,82	20,00	0,32	23	Fronting	8,76E+08	1,1E-06
20	0,82	0,26	0,30	19	Fronting	9,65E+08	9,0E-07
25	0,82	25,00	0,29	17	Fronting	1,03E+09	8,0E-07
30	0,82	25,00	0,29	15	Fronting	1,07E+09	7,0E-07

Tabelle A.3: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0450#24 mit 25 μm Kanallänge als Funktion der Gate-Spannung V_g .

V_g	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
0	0,32	0,47	0,03	389	Tailing	9,88E+05	/
5	0,76	0,35	0,40	56	Tailing	7,88E+06	2,5E-05
10	0,98	0,36	0,66	52	Tailing	1,80E+07	1,6E-05
15	1,16	4,31	0,95	49	Fronting	2,69E+07	1,2E-05
20	1,32	0,28	1,16	50	Fronting	3,78E+04	9,2E-06
25	1,42	4,24	1,26	47	Fronting	4,35E+07	8,0E-06
30	1,48	0,27	0,09	756	Tailing	1,69E+05	7,4E-06

Tabelle A.4: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0450#31 mit 10 μm Kanallänge als Funktion der Gate-Spannung V_g .

V_g	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
0	0,32	0,47	0,03	389	Tailing	9,88E+05	/
5	0,76	0,35	0,40	56	Tailing	7,88E+06	2,5E-05
10	0,98	0,36	0,66	52	Tailing	1,80E+07	1,6E-05
15	1,16	4,31	0,95	49	Fronting	2,69E+07	1,2E-05
20	1,32	0,28	1,16	50	Fronting	3,78E+04	9,2E-06
25	1,42	4,24	1,26	47	Fronting	4,35E+07	8,0E-06
30	1,48	0,27	0,09	756	Tailing	1,69E+05	7,4E-06

Pulshöhe

Tabelle A.5: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0450#24 mit 25 μm Kanallänge als Funktion der Pulshöhe.

Pulshöhe	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
V	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
2	0,37	0,24	0,02	548	Tailing	6,89E+05	4,9E-05
4	0,60	1,15	0,41	50	Tailing	2,64E+06	-1,0E-07
6	0,78	0,36	0,53	49	Fronting	6,40E+06	2,3E-05
8	0,83	1,94	0,57	45	Fronting	1,06E+07	2,1E-05
10	1,02	0,36	0,76	49	Fronting	1,96E+07	1,5E-05

Tabelle A.6: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0450#31 mit 10 μm Kanallänge als Funktion der Pulshöhe.

Pulshöhe	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
V	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
02V	0,50	1,67	0,49	45	Fronting	4,17E+06	9,7E-06
04V	0,59	2,38	0,55	49	Fronting	1,16E+07	8,7E-06
06V	0,60	2,86	0,55	49	Fronting	2,17E+07	8,1E-06
08V	0,63	3,45	0,57	50	Tailing	3,54E+07	7,5E-06
10	0,65	3,85	0,57	53	Tailing	5,15E+07	7,3E-06

Tabelle A.7: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0471#24 mit 25 μm Kanallänge als Funktion der Pulshöhe.

Pulshöhe	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
V	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
2	0,41	0,31	0,03	285	Tailing	1,02E+06	3,3E-05
4	0,83	1,61	0,45	41	Fronting	5,28E+06	/
6	1,16	0,65	0,58	40	Fronting	1,57E+07	1,3E-05
8	1,39	0,74	0,69	37	Fronting	3,60E+07	8,3E-06
10	1,56	0,78	0,83	35	Fronting	7,00E+07	6,1E-06

Tabelle A.8: Kennwerte der Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der ansteigenden Flanke *Rise* des Transistor 0471#31 mit 25 μm Kanallänge als Funktion der Pulshöhe.

Pulshöhe	$v_{\text{Vert-max}}$	$v_{\text{Vert-start}}$	B_{50}	Tailing	Form der Verteilung	Anzahl Ladungsträger	t_{tr}
V	m/s	m/s	m/s	%	/	/	s
2	0,82	0,35	0,55	61	Tailing	4,55E+06	6,2E-06
4	0,82	0,36	0,48	54	Tailing	1,81E+07	4,7E-06
6	0,82	5,26	0,39	51	Tailing	4,94E+07	4,1E-06
8	0,82	6,67	0,39	48	Fronting	1,11E+08	4,0E-06
10	0,82	8,33	0,39	45	Fronting	1,89E+08	1,3E-06

Tagesvergleich

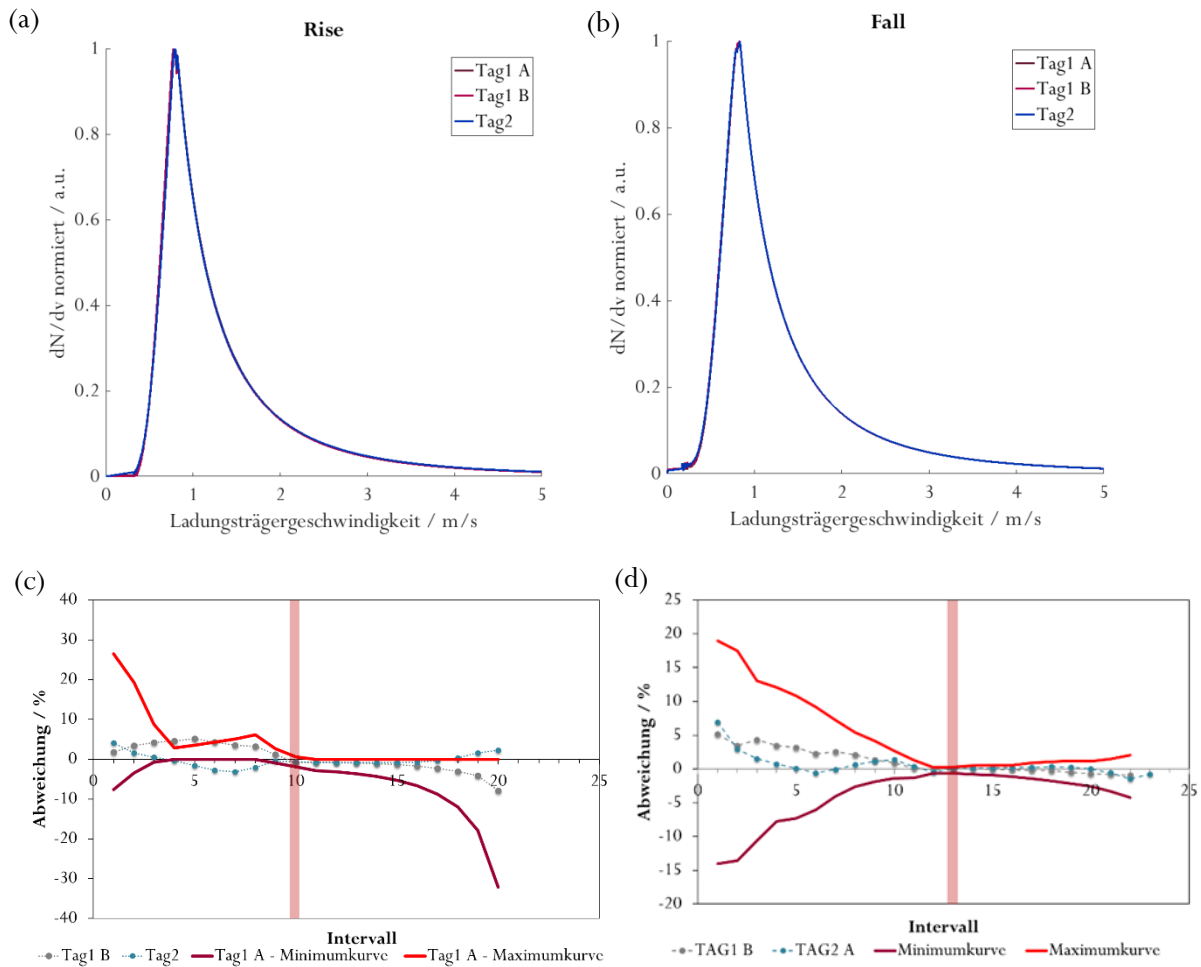


Abbildung A.4: Normierte Ladungsträgergeschwindigkeitsverteilung der SP400-Transistoren (Proben: 0459, 0460 und 0490) für mit 10 μm Kanallänge der Flanken *Rise* (a) und *Fall* (b) sowie die zugehörigen Abweichungsanalysen für *Rise* (c) und *Fall* (d). Eine signifikante Abweichung ist in keiner der Darstellungen zu erkennen.

Schichtdicke im Spin-Coating am Halbleiter SP400

Tabelle A.9: Kennwerte Halbwertsbreite B_{50} , Tailing, Anzahl der Ladungsträger und Geschwindigkeit bei Start der Verteilung der SP400-Transistoren in Abhängigkeit der Schichtdicke (Proben: 0465, 0466, 0467, 0468, 0469, 0470 und 0471). Für die kursiv gedruckten Kennwerte liegt ein Extraktionsfehler vor. Die Referenz bei 27 nm und 1000 rpm sowie die zugehörigen Toleranzen sind Fett markiert.

Schichtdicke nm	Halbwertsbreite m/s	Tailing %	Anzahl Ladungsträger -	v(Vert-start) m/s
120	0,971	36	8,09E+07	0,5
67	0,930	36	1,23E+08	9,6
41	0,948	39	1,32E+08	9,6
27	0,948	38	1,27E+08	0,4
27	0,894	37	1,07E+08	0,5
22	0,908	36	6,84E+04	0,5
20	0,949	38	1,04E+08	8,6
Minimumtoleranz	0,911	-	1,12E+08	0,5
Maximumtoleranz	0,949	-	1,33E+08	9,6

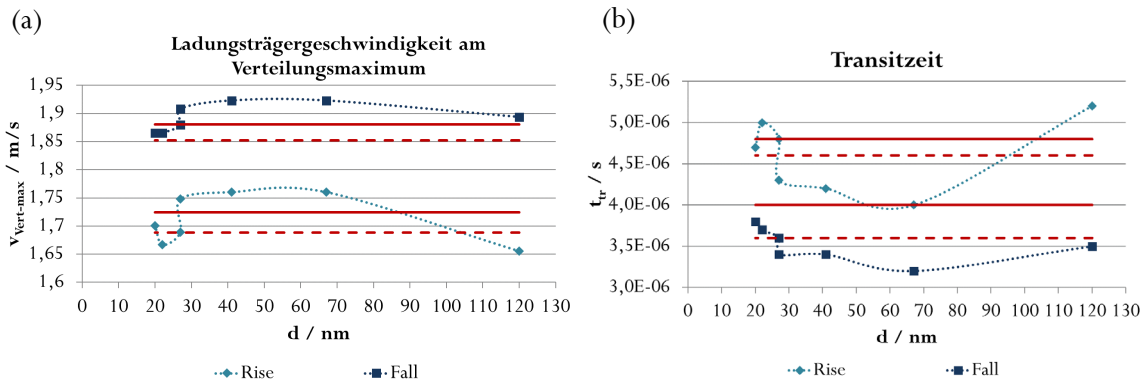


Abbildung A.5: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{vert-max}}$ (a) und Transitzeit t_{tr} sowie Gütefaktor α (b) für SP400-Transistoren in Abhängigkeit der Schichtdicke (Proben: 0465, 0466, 0467, 0468, 0469, 0470 und 0471) mit Probe 2500 rpm (20 nm) als Referenz.

Schichtdicke im Spin-Coating für Halbleiter PIF8-TAA

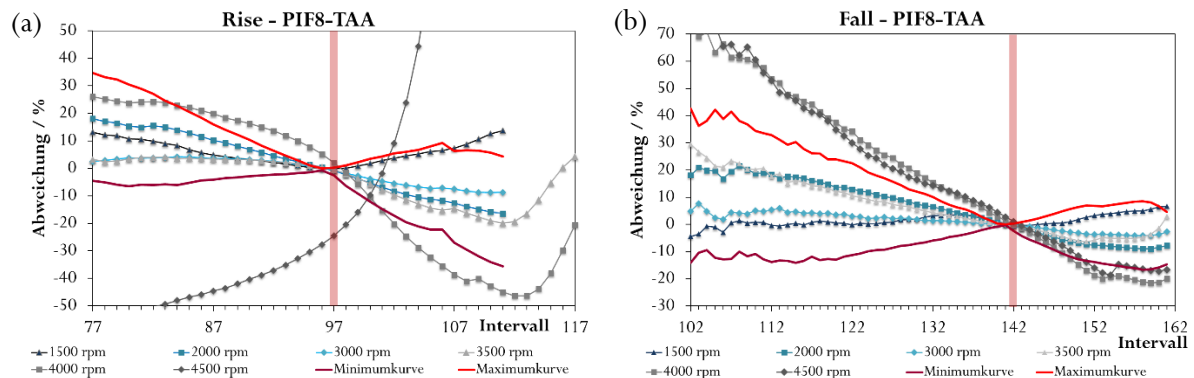


Abbildung A.6: Abweichungsanalyse für *Rise* (a) und *Fall* (b) der im Spin-Coating erzeugten Proben als Funktion der Rotationsgeschwindigkeit für den Halbleiter PIF8-TAA (Proben: 0444, 0445, 0446, 0447, 0448, 0449 und 0450).

Einfluss des Beschichtungsprozesses für Halbleiter SP400

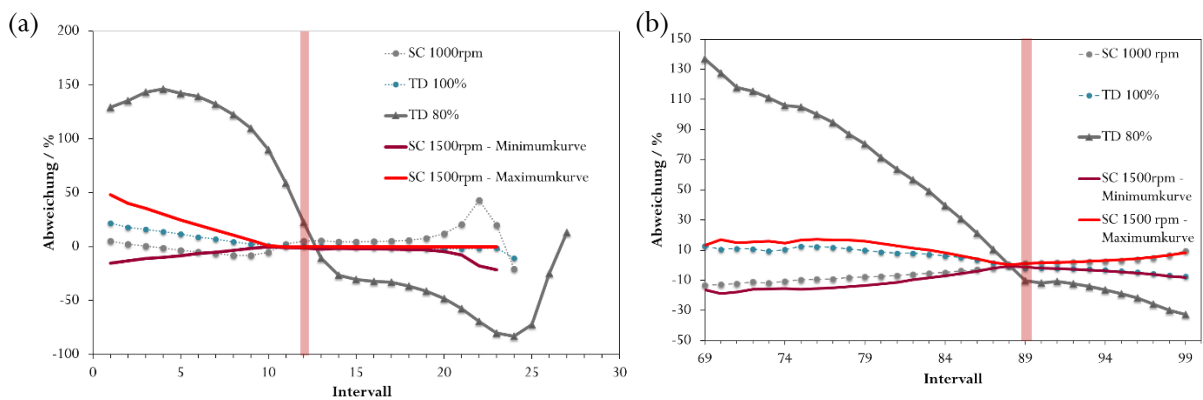


Abbildung A.7: Abweichungsanalysen von *Rise* (a) und *Fall* (b) des Vergleichs Spin-Coating 1000 rpm und 1500 rpm sowie Tiefdruck mit 100% und 80% Flächendeckung für den Halbleiter SP400 (Proben: 0468, 0469, 0490 und 0494).

Einfluss des Beschichtungsprozesses für den Halbleiter PIF8-TAA

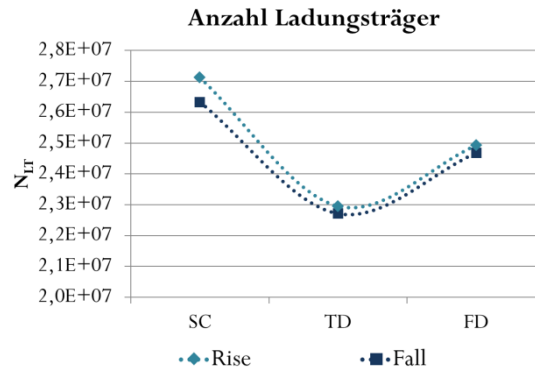


Abbildung A.8: Anzahl der Ladungsträger N_{LT} in Abhängigkeit des Beschichtungsprozesses für den Halbleiter PIF8-TAA (Proben 0445, 0484 und 0500).

Einfluss der Druckgeschwindigkeit für Halbleiter PIF8-TAA

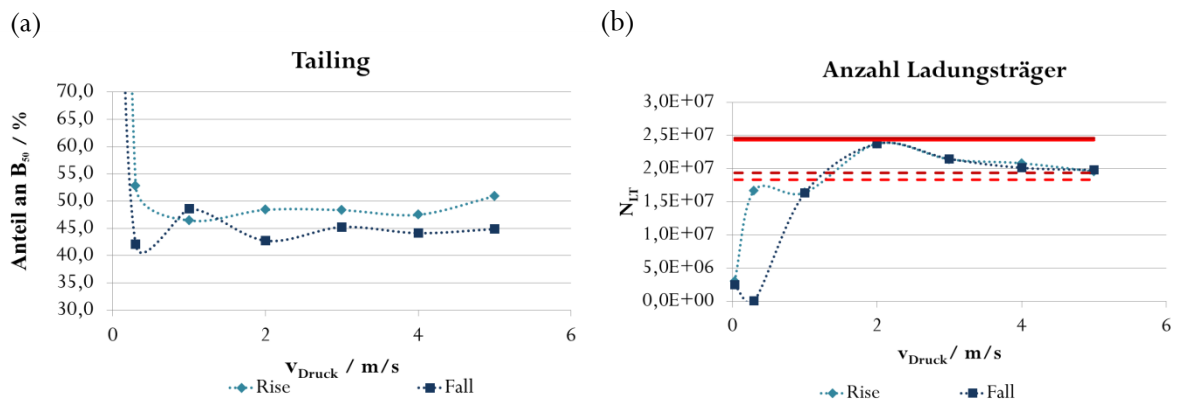


Abbildung A.9: Tailing (a) und Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (b) für 25 μm -Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA (Proben: 0430+0431, 0432+0433, 0434+0435, 0436+0437, 0438+0439, 0440+0441 und 0442+0443) in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit.

Einfluss der Druckgeschwindigkeit für Halbleiter SP400

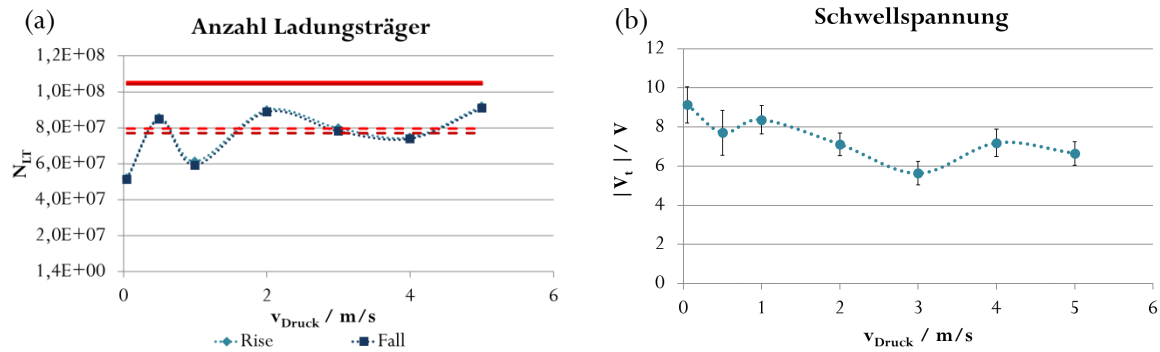


Abbildung A.10: Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (a) und Betrag der Schwellspannung V_t (b) für Transistoren des Halbleiters SP400 (Proben: 0451+0452, 0453+0454, 0455+0456, 0457+0458, 0459+0460, 0461+0462 und 0464) in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit.

Einfluss der Druckformparameter für Halbleiter SP400

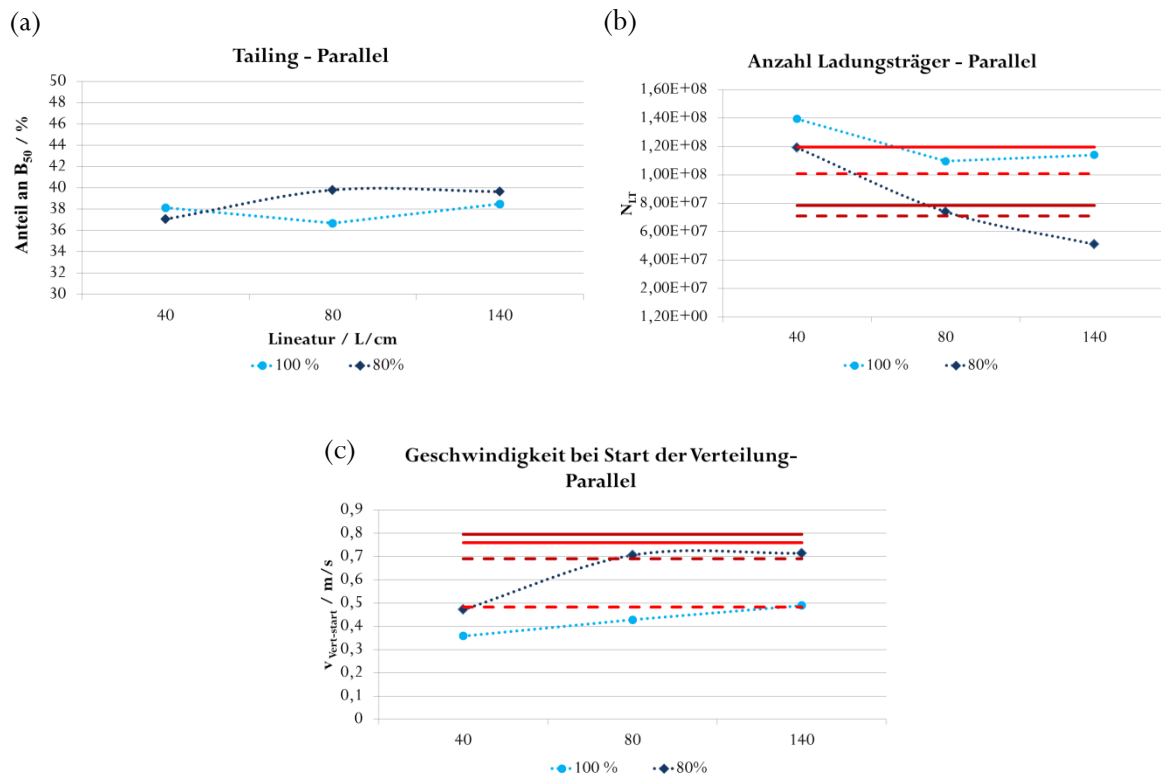


Abbildung A.11: Tailing (a), Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (b) und Geschwindigkeit bei Start der Verteilung (c) für parallel ausgerichtete Transistoren des Halbleiters SP400 (Proben: 0474, 0478, 0482, 0486, 0490 und 0494) in Abhängigkeit von der Lineatur.

Einfluss der Druckformparameter für Halbleiter PIF8-TAA

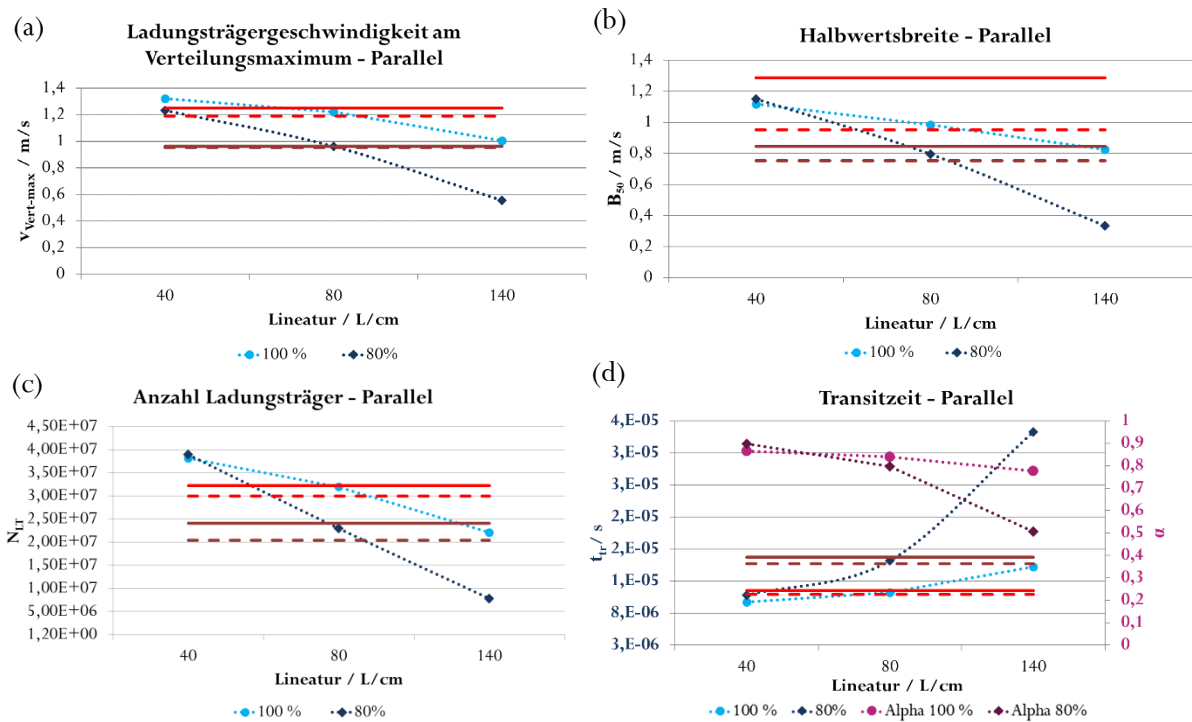


Abbildung A.12: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Anzahl der detektierten Ladungsträger N_{LT} (c) und Transitzeit t_{tr} sowie Gütefaktor α (d) in Abhängigkeit der Lineatur für parallel ausgerichtete Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA (Proben: 0472, 0476, 0480, 0484, 0488 und 0492).

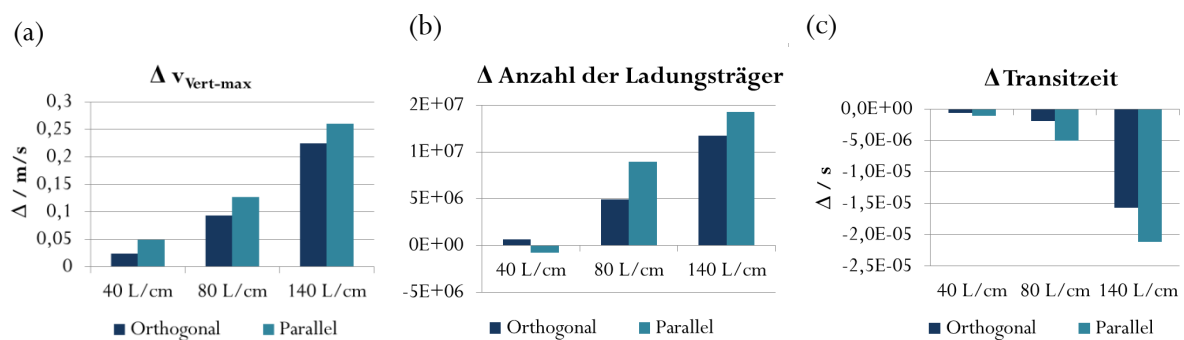


Abbildung A.13: Differenzwerte bei 100 % und 80 % Flächendeckung des Halbleiters PIF8-TAA für die Geschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a), die Anzahl der Ladungsträger N_{LT} (b) und die Transitzeit t_{tr} (c) in Abhängigkeit der Lineatur und als Funktion der Ausrichtung des Transistors (Proben: 0472, 0473, 0476, 0477, 0480, 0481, 0484, 0485, 0488, 0489, 0492 und 0493).

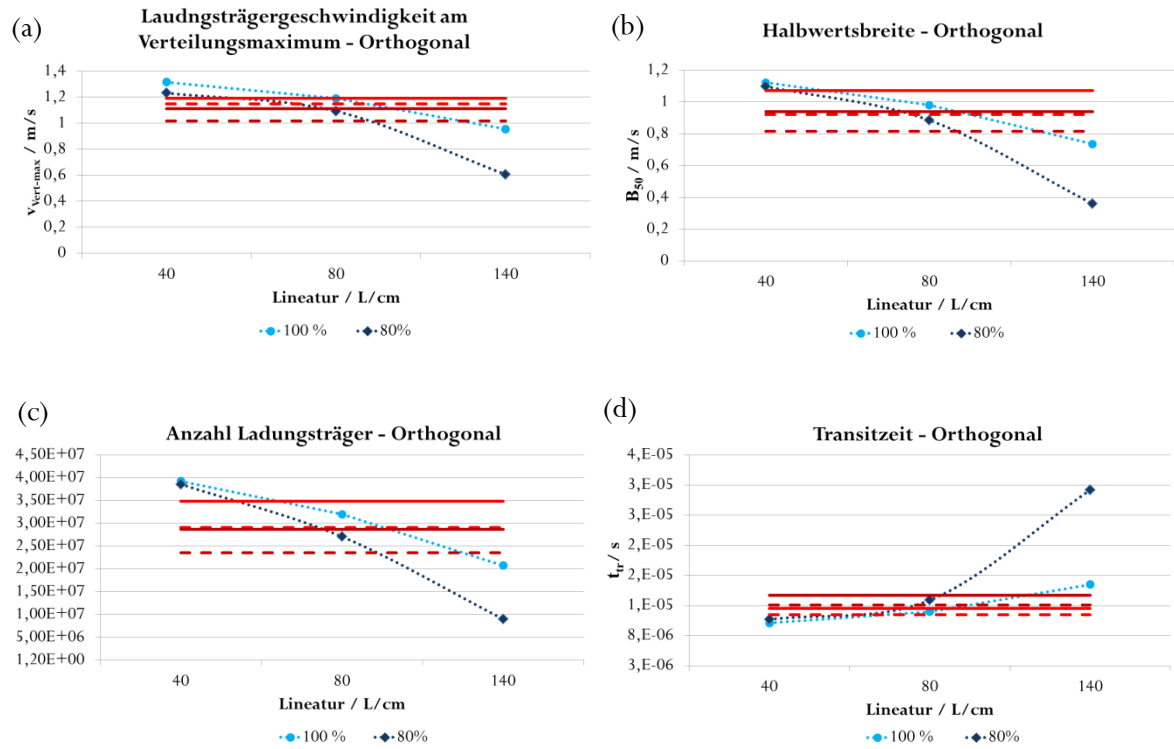


Abbildung A.14: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b), Anzahl der detektierten Ladungsträger N_{LT} (c) und Transitzeit t_{tr} (d) in Abhängigkeit der Lineatur für orthogonal ausgerichtete Transistoren des Halbleiters PIF8-TAA (Proben: 0473, 0477, 0481, 0485, 0489 und 0493).

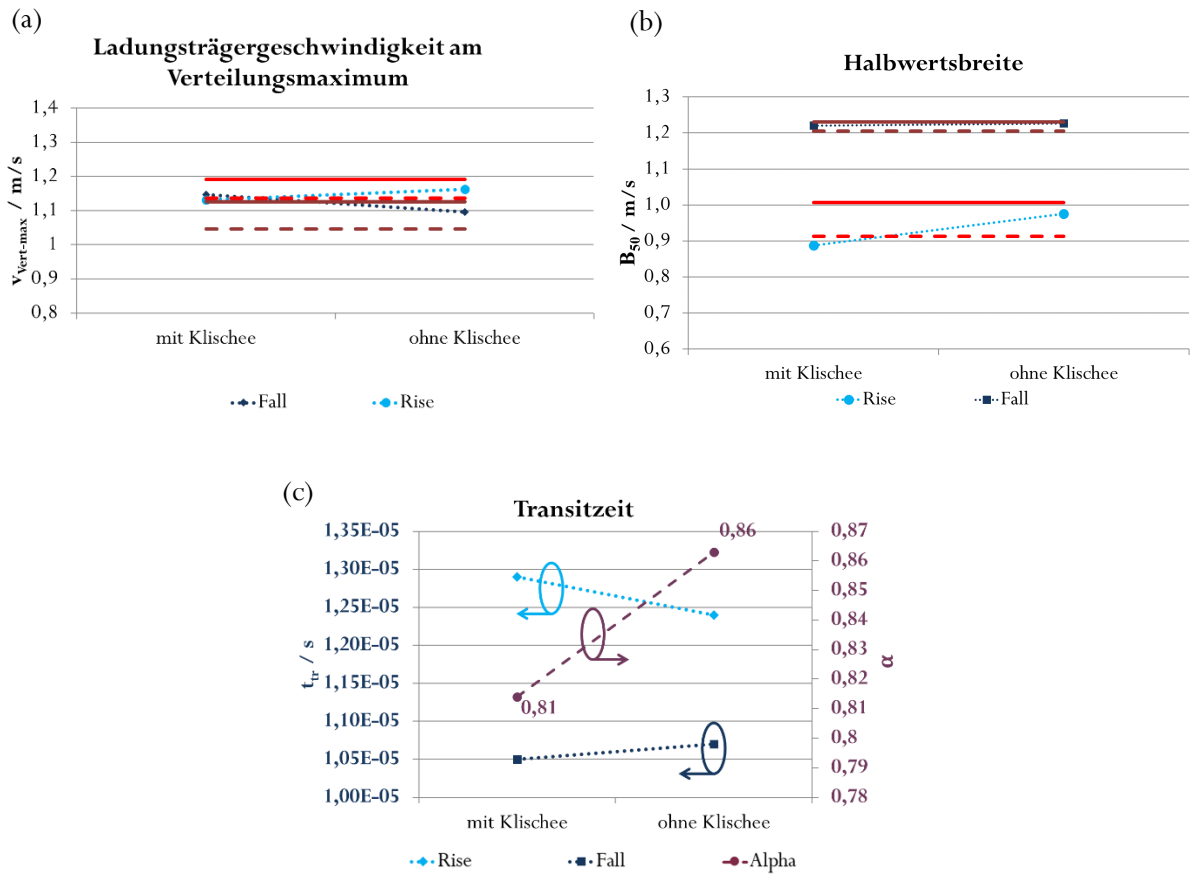
Flexodruck

Abbildung A.15: Ladungsträgergeschwindigkeit am Verteilungsmaximum $v_{\text{Vert-max}}$ (a), Halbwertsbreite B_{50} (b) und Transitzeit sowie Gütefaktor α (c) für im Spin-Coating hergestellte Proben mit und ohne Verunreinigungen durch das Klischee im Halbleiter (Proben: 0506+0481).

A.3. Trendtabellen

Tabelle A.10: Trends der Kennwerte für zunehmende Rotationsgeschwindigkeiten im Spin-Coating für beide Halbleiter.

Parameter	SP400		PIF8-TAA	
	25 μm Rise	25 μm Fall	25 μm Rise	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	○	(↘)	(↘)	(↘)
$V_{\text{Vert-start}}$	⊗	(↘)	(→)	(→)
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	○	(↘)	○	(↘)
Halbwertsbreite B_{50}	○	(↘)	↘	(↘)
Tailing bei 50 %	○	○	↘	↗
Transitzeit t_{tr}	(↗)	(↘)	(↗)	(↗)

Tabelle A.11: Trends der Kennwerte für Proben des Halbleiters PIF8-TAA mit und ohne Klischee. Die Trends zeigen den Wandel von „mit“ zu „ohne Klischee“ an.

Parameter	SC		TD Orthogonal		TD Parallel	
	25 μm Rise	25 μm Fall	25 μm Rise	25 μm Fall	25 μm Rise	25 μm Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	↗	↘	↗	↗	↗	↗
$V_{\text{Vert-start}}$	→	→	→	↘	→	↘
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Halbwertsbreite B_{50}	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Tailing bei 50 %	↗	↘	→	↗	↘	↗
Transitzeit t_{tr}	↘	↗	↘	↘	↘	↘

Tabelle A.12: Trends der Kennwerte für die Abfallende Flanke parallel und orthogonal ausgerichteter Transistoren mit ansteigender Lineatur (40-80-140 L/cm) für den Halbleiter SP400.

Parameter	Parallel		Orthogonal	
	100 % Fall	80 % Fall	100 % Fall	80 % Fall
$V_{\text{Vert-max}}$	↘	↘	↘	↘
$V_{\text{Vert-start}}$	↘	↘	(↘)	↘
Anzahl der Ladungsträger N_{LT}	○	↘	○	↘
Halbwertsbreite B_{50}	↗	↗	↗	↗
Tailing bei 50 %	↗	○	↗	○
Transitzeit t_{tr}	↗	↗	↗	↗

A.4. Matlab-Skript (GeschVert_RiseAndFall)

```

clear;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
s.Datenordner='E:\GeschVert_ARBEITSORDNER\AUSWERTEN';
s.Speicherort = 'E:\GeschVert_ARBEITSORDNER';
s.AuswertungsOrdner = '0472';

SP400=0;% Abfrage welcher Halbleiter vorliegt
in.laenge=25*10^-6;
Messspitzenraus=1;% [m] gerade=25 µm / ungerade= 10 µm
lokminraus_rise=0; % bei Anormalität der Leitungsreflexionen
lokmaxraus_fall=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
in.zv=0; % Zeitverschiebung
in.elementarladung=1.6021766208*10^-19; %[C]
in.Differentiationsbreite=120;
in.Fallgrenze=9.8;
in.Vergroesserungsfaktor=20000;
in.e=2.71828182845904523536028747135266249775724709369995;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if SP400==1
    in.Messwiderstand=10000;
    in.var=100;
    in.har=50;
    in.dar=30;
    in.vaf=100;
    in.haf=50;
    in.daf=30;
else
    in.Messwiderstand=27000;
    in.var=250;
    in.har=100;
    in.dar=70;
    in.vaf=250;
    in.haf=100;
    in.daf=70;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Messdateien einlesen und Dateinamen generieren

s.files1 = dir(s.Datenordner);
s.names1 = {s.files1.name};
s.L = length(s.names1);

for j = 3:(s.L),
    s.tName = s.names1{j};
    s.files2 = dir([s.Datenordner, '\', s.tName]);
    s.names2 = {s.files2.name};

    s.name_Messkurve = s.tName;
    s.name_fall = [s.tName, '_fall'];
    s.name_rise = [s.tName, '_rise'];
    s.name_rise_fit=[s.tName, '_rise_fit'];
    s.name_fall_fit=[s.tName, '_fall_fit'];
    s.TR = [s.tName, '.mat'];
    s.Textdateiname=[s.tName, '.xlsx'];

    s.filename1 = [s.Datenordner, '\', s.tName, '\', s.names2{3}]; %CH1
    s.filename2 = [s.Datenordner, '\', s.tName, '\', s.names2{4}]; %CH2
    s.filename3 = [s.Datenordner, '\', s.tName, '\', s.names2{5}]; %MA2

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%CH1

    delimiter = ',';
    startRow = 2;

```

```

formatSpec = '%f%f%[\n\r]';
fileID = fopen(s.filename1,'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter,
    'EmptyValue' ,NaN, 'HeaderLines' ,startRow-1, 'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);
t.s = dataArray(:, 1);
p.CH1V = dataArray(:, 2);
clearvars filename delimiter startRow formatSpec fileID dataArray ans;

%CH2

delimiter = ',';
startRow = 2;
formatSpec = '%f%f%[\n\r]';
fileID = fopen(s.filename2,'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue'
    ,NaN, 'HeaderLines' ,startRow-1, 'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);
t.s2 = dataArray(:, 1);
r.CH2V = dataArray(:, 2);
clearvars filename delimiter startRow formatSpec fileID dataArray ans;

%MA2

delimiter = ',';
startRow = 2;
formatSpec = '%f%f%[\n\r]';
fileID = fopen(s.filename3,'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'EmptyValue'
    ,NaN, 'HeaderLines' ,startRow-1, 'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);
t.s3 = dataArray(:, 1);
d.MA2 = dataArray(:, 2);
clearvars filename delimiter startRow formatSpec fileID dataArray ans;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Zeitverschiebung zu allen Zeitwerten addieren, falls nötig
t.szv=t.s(1:end,1)+in.zv;

%%% Zur Kontrolle der Reflexionen
r.CH2V_ur=r.CH2V;
Urkurve=figure;
plot(t.s, r.CH2V_ur);

%%% Spannungsspitzen raus

if Messspitzenraus==1

    %%% Test, ob es sich um normale Reflexionen handelt, indem geprüft

    r.CH2V_maxrise=max(r.CH2V(1:485,1));
    r.CH2V_maxriseplace=find(r.CH2V==r.CH2V_maxrise);

    if r.CH2V(r.CH2V_maxriseplace-1,1)<0 % Fall der "normalen Reflexionen"

        %%% Schritt 1: Finde Minimum und ersetze die Werte davor und am
        %%% Minimum durch Messwerte vor der Reflexion.
        r.CH2V_min=min(r.CH2V(1:2000,1));
        r.CH2V_minplace=find(r.CH2V==r.CH2V_min);

        for a=1:5
            if r.CH2V(r.CH2V_minplace-a,1)>0
                b=0;
                break
            else
                b=a;
                break
            end
        end;

        %%% Minimum ersetzen
        r.CH2V(r.CH2V_minplace)=r.CH2V(r.CH2V_minplace-(b+1));

```

```

    %%% Werte vor Minimum ersetzen
    for x=1:b
        r.CH2V(r.CH2V_minplace-x)=r.CH2V(r.CH2V_minplace-(b+1));
    end;

    %%% Prüfung ob Kurve steigt oder Parabelartig läuft

    if lokminraus_rise==1 %%% Parabelartig

        for f=5:100
            lokmin=min(r.CH2V(r.CH2V_minplace+4:r.CH2V_minplace+f));
            lokminplace=find(r.CH2V==lokmin);
        end;

        %%% Werte nach Minimum ersetzen
        for kr=r.CH2V_minplace+1:lokminplace
            r.CH2V(kr)=r.CH2V(lokminplace);
        end;

    else

        %%% Werte vor Minimum ersetzen
        for x=1:b
            r.CH2V(r.CH2V_minplace-x)=r.CH2V(r.CH2V_minplace-(b));
        end;

        %%% Werte nach Minimum ersetzen
        for kr=r.CH2V_minplace+1:r.CH2V_minplace+2;
            r.CH2V(kr)=r.CH2V(r.CH2V_minplace(1,1)+4);
        end;

    end;

else %%% direkter Anstieg

    %%% Werte nach Maximum ersetzen
    for kr=r.CH2V_maxriseplace:r.CH2V_maxriseplace+2;
        r.CH2V(kr)=r.CH2V(r.CH2V_maxriseplace(1,1)+3);
    end;

    display('Anormalität Reflexionen rise');

    r.CH2V_minplace=r.CH2V_maxriseplace;

end;

r.CH2V_minfall=min(r.CH2V(2001:3485,1));
r.CH2V_minfallplace=find(r.CH2V==r.CH2V_minfall);
r.satwert1=mean(r.CH2V(r.CH2V_minfallplace-10:r.CH2V_minfallplace-1,1));

if r.CH2V(r.CH2V_minfallplace-1,1)>(r.satwert1*1.05) %%% wahr für normale Reflexion

    %%% Maximum finden
    r.CH2V_max=max(r.CH2V);
    r.CH2V_maxplace=find(r.CH2V==r.CH2V_max);

    r.satwert=mean(r.CH2V(r.CH2V_maxplace-10:r.CH2V_maxplace-1,1));

    for c=1:5
        if r.CH2V(r.CH2V_maxplace-c)>(0.9*r.satwert);
            e=c;
            break
        else
            e=10;
        end;
    end;

    %%% Maximum ersetzen
    r.CH2V(r.CH2V_maxplace)=r.CH2V(r.CH2V_maxplace-e);

    %%% Werte vor Maximum ersetzen
    for y=1:e
        r.CH2V(r.CH2V_maxplace-y)=r.CH2V(r.CH2V_maxplace-e);
    end;

```

```

    %%% Abfall Parabelartig
    if lokmaxraus_fall==1

        lokmax=max(r.CH2V(r.CH2V_minfallplace+5:r.CH2V_minfallplace+100));
        lokmaxplace=find(r.CH2V==lokmax);

        for m=(r.CH2V_minfallplace):lokmaxplace
            r.CH2V(m,1)=lokmax;
        end;

    else %%% Werte nach Maximum ersetzen)

        for kf=r.CH2V_maxplace+1:r.CH2V_maxplace+3;
            r.CH2V(kf)=r.CH2V(r.CH2V_maxplace+4);
        end;

    end;

else %%% anormale Reflexion

    for g=r.CH2V_minfallplace:r.CH2V_minfallplace+3;
        r.CH2V(g,1)=r.CH2V(r.CH2V_minfallplace+4);
    end;

    r.CH2V_maxplace=r.CH2V_minfallplace;

    display('Anormalität Reflexion fall');

end;

clear a b c e f g m kf kr;

else

    r.CH2V_maxrise=max(r.CH2V(1:500,1));
    r.CH2V_maxriseplace=find(r.CH2V==r.CH2V_maxrise);
    r.CH2V_minplace=r.CH2V_maxriseplace;

    r.CH2V_minfall=min(r.CH2V(2001:3500,1));
    r.CH2V_minfallplace=find(r.CH2V==r.CH2V_minfall);
    r.CH2V_maxplace=r.CH2V_minfallplace;

end;

% Daten um in.Differentiationsbreite/2 korrigieren

t.szv_korr=t.szv(1:(length(t.szv)-in.Differentiationsbreite/2),1);
p.korr=p.CH1V(1:(length(p.CH1V)-in.Differentiationsbreite/2),1);
r.korr=r.CH2V(1:(length(r.CH2V)-in.Differentiationsbreite/2),1);

% Ableitung MA bilden:

for i=61:(length(r.CH2V)-(in.Differentiationsbreite))
    d.MA_selbst(i+60,1)=(r.CH2V((i+in.Differentiationsbreite/2),1)
    -r.CH2V((i-in.Differentiationsbreite/2),1))
    /((6000/in.Differentiationsbreite)*0.0000001)
    ./in.Messwiderstand.*in.Vergroesserungsfaktor;
end

% Prüfe Parabelartigen Abfall bei Fall
if lokmaxraus_fall==1
    d.MA_selbst((lokmaxplace-100):(lokmaxplace+100))=d.MA_selbst(200,1);
end;

% Messdaten in zwei Teile schneiden
start_fall=find(p.korr>in.Fallgrenze); %finde alle Stellen, an denen Ue>Fallgrenze ist

t.fall=t.szv_korr((max(start_fall)-200):end,1); %schneide alles Ue<Fallgrenze ab, nimm
aber noch 200 Werte vorher für einen schöneren Plot dazu
p.fall=p.korr((max(start_fall)-200):end,1);
r.fall=r.korr((max(start_fall)-200):end,1)
d.fall=d.MA_selbst((max(start_fall)-200):end,1

t.rise=t.szv_korr(1:(max(start_fall)-100));

```



```

p.rise=p.korr(1:(max(start_fall)-100));
r.rise=r.korr(1:(max(start_fall)-100));
d.rise=d.MA_selbst(1:(max(start_fall)-100));

Messkurve=figure('units','normalized','position',[0,0,1,1]);
hold on;%damit alle Plots in einem Diagramm landen
subplot(2,1,1);
hold on;
[A,B,C]=plotyy(t.s,p.CH1V,t.s,r.CH2V);
    B.Color='b';
    C.Color='r';
    B.LineWidth=2;
    C.LineWidth=2;
xlabel('Zeit / s','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
ylabel('Spannung / V','FontSize',12);
title('Messdaten','FontSize', 16);
legend('Ue CH1','Ua CH2');

subplot(2,1,2);
hold on;
plot(t.szv_korr,d.MA_selbst,'Color','b','Linewidth',1);
xlabel('Zeit / s','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
ylabel('dI/dt','FontSize',12);
title('Berechnete Ableitung','FontSize', 16);
legend('Differenziertes Stromsignal');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% RISE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Setze Ableitungsfehler bei Parabelanstieg = 0
if lokminraus_rise==1
d.rise((lokminplace-100):(lokminplace+100),1)=d.rise(200,1);
else
end;

% finde Nullpunkt und schneide hier ab
start_rise=find(p.rise>0);
t.rise_cut=t.rise((start_rise(1,1)):end,1); %schneide alles vor s>0 ab
d.rise_cut=d.rise((start_rise(1,1)):end,1);
r.rise_cut=r.rise((start_rise(1,1)):end,1);

% Erweitere XXX_cut um 200 Werte für bessere Plots
t.rise_cut_pl=t.rise((start_rise(1,1)-100):end,1);
p.rise_cut_pl=p.rise((start_rise(1,1)-100):end,1);
r.rise_cut_pl=r.rise((start_rise(1,1)-100):end,1);
d.rise_cut_pl=d.rise((start_rise(1,1)-100):end,1);

% Setze alle Werte der Ableitung <0 auf Null und normiere
d.rise_cut(d.rise_cut<=0)=0;
d.rise_cut_norm=d.rise_cut./(max(d.rise_cut));

% Berechne Geschwindigkeit
t.velocity_rise=in.laenge./(flip(t.rise_cut));% berechne Geschwindigkeit

% Passe Geschwindigkeit für Plots an
t.velocity_rise_pl=in.laenge./t.rise_cut_pl;
t.velocity_rise_pl(t.velocity_rise_pl<=0)=0; % Kurve beginnt mit hohen Geschwindigkeiten,
deshalb werden die Werte, die wir "löschen" wollen mit hohen Geschwindigkeit ersetzt: somit
verschwindet Querbalken im Diagramm

%%%% Berechne Geschwindigkeitsverteilung für gekürzte Werte

cr.veldistr_rise=((flip(t.rise_cut).^2)./(in.elementarladung*in.laenge)).*flip(d.rise_cut).*0.
0000001./in.Vergroesserungsfaktor;

%%%%

% Setze anfängliches Rauschen=0
for lz=1:length(cr.veldistr_rise)
    if cr.veldistr_rise(lz,1)==0 && cr.veldistr_rise(lz+1,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+2,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+3,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+4,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+5,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+6,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+7,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+8,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+9,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+10,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+11,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+12,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+13,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+14,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+15,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+16,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+17,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+18,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+19,1)>0 &&

```

```

cr.veldistr_rise(lz+20,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+21,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+22,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+23,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+24,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+25,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+26,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+27,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+28,1)>0 &&
cr.veldistr_rise(lz+29,1)>0 && cr.veldistr_rise(lz+30,1)>0
    cr.rauschen=lz;
    break
else
    continue
end;
end;

cr.veldistr_rise_cut=cr.veldistr_rise(1:end,1);
cr.veldistr_rise_cut(1:cr.rauschen,1)=0;

% Wenn hinten nochmal eine Null auftaucht schneide an dieser Stelle ab
cr.veldistr_rise_cut_help=cr.veldistr_rise_cut(1:end,1);
cr.veldistr_rise_cut_help(1:cr.rauschen,1)=8; % Setze alle für das Rauschen gesetzten
Nullen gleich "8" damit sie nicht stören
cr.HelpVeldistrCut=find(cr.veldistr_rise_cut_help==0

if isempty(cr.HelpVeldistrCut)==1 % prüfe ob eine Null gefunden wurde
    cr.veldistr_rise_cut=cr.veldistr_rise_cut(1:end,1);
    t.velocity_rise_distr=t.velocity_rise(1:end,1);
elseif cr.HelpVeldistrCut(1,1)<3520 % Prüfe ob die Null zeitlich vor der Verteilung
kommt oder hinterher
    for lz2=1:length(cr.HelpVeldistrCut)-1
        if cr.HelpVeldistrCut(lz2,1)<3450 % wenn Null vor der Verteilung kommt,
nimm die nächste gefundene Null weil man sonst die Verteilung abschneidet
            cr.HelpCut=cr.HelpVeldistrCut(lz2+1,1);
            break
        end;
    end;

    if length(cr.HelpVeldistrCut)==1
        cr.HelpCut=cr.HelpVeldistrCut;
    end;

    if cr.HelpVeldistrCut<=3520
        cr.veldistr_rise_cut=cr.veldistr_rise_cut(1:end,1);
        t.velocity_rise_distr=t.velocity_rise(1:end,1);
    else
        cr.veldistr_rise_cut=cr.veldistr_rise_cut(1:cr.HelpCut-1,1);
        t.velocity_rise_distr=t.velocity_rise(1:cr.HelpCut-1,1);
    end;
else % wenn eine Null kommt, die nach der Verteilung kommt mache hier weiter
    cr.HelpCut=cr.HelpVeldistrCut(1,1);
    cr.veldistr_rise_cut=cr.veldistr_rise_cut(1:cr.HelpCut-1,1);
    t.velocity_rise_distr=t.velocity_rise(1:cr.HelpCut-1,1);
end;

% Normierung der vom Digitalisierungsrauschen-befreiten Verteilung
cr.veldistr_rise_norm=cr.veldistr_rise_cut./max(cr.veldistr_rise_cut);
t.velocity_rise_distr(1:cr.rauschen,1)=0;

% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% KENNWERTE RISE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%      Geschwindigkeit für Start und Sat der Ableitung
%%%      v(Vert-max)
cr.NormMax_rise=find(cr.veldistr_rise_norm==1);
cr.NormMaxVel_rise=t.velocity_rise_distr(cr.NormMax_rise(1,1));

%%%      Geschwindigkeit bei Beginn der Verteilung v(Vert-start)= Geschwindigkeit bei der sich
zum ersten Mal etwas an der Verteilung der LT ändert

for n=cr.rauschen:(length(cr.veldistr_rise_cut)-1)
    if cr.veldistr_rise_cut(n,1)<10E5 && cr.veldistr_rise_cut(n+1,1)<10E5 &&
cr.veldistr_rise_cut(n+2,1)<10E5
        cr.Endwertfinder=n;
        break;
    else
        continue
    end;
end;

if t.velocity_rise_distr(n,1)==0

```

```

        cr.End_rise=t.velocity_rise_distr(n+1,1);
    else
        cr.End_rise=t.velocity_rise_distr(n,1);
    end;

    %% Breite der Verteilung an den Stellen 0,25/0,5/0,75

    cr.veldistr_rise_norm_sm=cr.veldistr_rise_norm;

    % %% Viertelwert

    cr.Viertelwert_rise=find(cr.veldistr_rise_norm_sm >= 0.25 & cr.veldistr_rise_norm_sm <=
0.35);
    cr.GetViertelwertV1_rise=t.velocity_rise_distr(cr.Viertelwert_rise(1,1));

    cr.ViertelwertV2_finden=find(cr.Viertelwert_rise>cr.Viertelwert_rise(1,1)+in.var);
cr.GetViertelwertV2_rise=t.velocity_rise_distr(cr.Viertelwert_rise(cr.ViertelwertV2_finden(1,1
),1));
    cr.Viertelwertsbreite_rise=cr.GetViertelwertV2_rise-cr.GetViertelwertV1_rise;
    cr.deltafrontingViertel=cr.GetViertelwertV2_rise-cr.NormMaxVel_rise;
    cr.deltatailingViertel=cr.NormMaxVel_rise-cr.GetViertelwertV1_rise;

    if cr.deltafrontingViertel>cr.deltatailingViertel
        cr.VertFormViertel='Fronting';
    elseif cr.deltafrontingViertel==cr.deltatailingViertel
        cr.VertFormViertel='Gauss';
    else
        cr.VertFormViertel='Tailing_';
    end;

    %% Halbwert

    cr.Halbwert_rise=find(cr.veldistr_rise_norm_sm>=0.5 & cr.veldistr_rise_norm_sm<=0.6);
    cr.GetHalbwertV1_rise=t.velocity_rise_distr(cr.Halbwert_rise(1,1));

    cr.HalbwertV2_finden=find(cr.Halbwert_rise>cr.Halbwert_rise(1,1)+in.har);

cr.GetHalbwertV2_rise=t.velocity_rise_distr(cr.Halbwert_rise(cr.HalbwertV2_finden(1,1),1));
    cr.Halbwertsbreite_rise=cr.GetHalbwertV2_rise-cr.GetHalbwertV1_rise;

    cr.deltafrontingHalb=cr.GetHalbwertV2_rise-cr.NormMaxVel_rise;
    cr.deltatailingHalb=cr.NormMaxVel_rise-cr.GetHalbwertV1_rise;

    if cr.deltafrontingHalb>cr.deltatailingHalb
        cr.VertformHalb='Fronting';
    elseif cr.deltafrontingHalb==cr.deltatailingHalb
        cr.VertformHalb='Gauss';
    else
        cr.VertformHalb='Tailing_';
    end;

    %% Dreiviertelwert

    cr.Dreiviertelwert_rise=find(cr.veldistr_rise_norm_sm>=0.75 &
cr.veldistr_rise_norm_sm<=0.85);
    cr.GetDreiviertelwertV1_rise=t.velocity_rise_distr(cr.Dreiviertelwert_rise(1,1));

    cr.DreiviertelwertV2_finden=find(cr.Dreiviertelwert_rise>cr.Dreiviertelwert_rise(1,1)+in.dar);

cr.GetDreiviertelwertV2_rise=t.velocity_rise_distr(cr.Dreiviertelwert_rise(cr.DreiviertelwertV
2_finden(1,1),1));
    cr.Dreiviertelwertsbreite_rise=cr.GetDreiviertelwertV2_rise-cr.GetDreiviertelwertV1_rise;

    cr.deltafrontingDreiviertel=cr.GetDreiviertelwertV2_rise-cr.NormMaxVel_rise;
    cr.deltatailingDreiviertel=cr.NormMaxVel_rise-cr.GetDreiviertelwertV1_rise;

    if cr.deltafrontingDreiviertel>cr.deltatailingDreiviertel
        cr.VertformDreiviertel='Fronting';
    elseif cr.deltafrontingDreiviertel==cr.deltatailingDreiviertel
        cr.VertformDreiviertel='Gauss';
    else
        cr.VertformDreiviertel='Tailing_';
    end;

```

```

% Fläche unter der Kurve = Anzahl Ladungsträger

cr.Flaechenstart_rise=find(cr.veldistr_rise_norm>0.001);

for n=cr.rauschen:(length(cr.veldistr_rise_cut)-5)
    if cr.veldistr_rise_cut(n,1)<10E5    &&    cr.veldistr_rise_cut(n+1,1)<10E5    &&
cr.veldistr_rise_cut(n+2,1)<10E5    &&    cr.veldistr_rise_cut(n+3,1)<10E5    &&
cr.veldistr_rise_cut(n+4,1)<10E5    &&    cr.veldistr_rise_cut(n,1)>0    &&
cr.veldistr_rise_cut(n+1,1)>0 && cr.veldistr_rise_cut(n+2,1)>0    &&
        break;
    else
        continue
    end;
end;

cr.Flaechenende_rise=n;

if cr.Flaechenende_rise< cr.Flaechenstart_rise+500
    for n=cr.rauschen+100:(length(cr.veldistr_rise_cut)-1)
        if cr.veldistr_rise_cut(n,1)<10E3    &&    cr.veldistr_rise_cut(n+1,1)<10E3    &&
cr.veldistr_rise_cut(n,1)>0
            display('Flaechenende_rise verschoben');
            break;
        else
            continue
        end;
    end;
end;

cr.Flaechenende_rise=n;

cr.veldistr_rise_flaechenraender=cr.veldistr_rise_cut(cr.Flaechenstart_rise(1,1):cr.Flaechenende_rise,1);

t.velocity_rise_flaechenraender=t.velocity_rise_distr(cr.Flaechenstart_rise(1,1):cr.Flaechenende_rise,1);

cr.Flaeche_rise2=trapz((t.velocity_rise_flaechenraender),(cr.veldistr_rise_flaechenraender));
cr.AnzahlLT=cr.Flaeche_rise2;

%%% TR1:50% Max-Wert

if Messspitzenraus==1
    r.rise_tr=r.rise; % Bilde neuen Vektor
    r.rise_tr(r.CH2V_minplace(1,1)-2:end)=r.rise_tr(r.CH2V_minplace(1,1)-2:end)-
r.CH2V(r.CH2V_minplace(1,1)+4); % Ziehe Plateauspannung ab
    r.rise_tr_cut=r.rise_tr(start_rise:end);
    cr.maxvolt=max(r.rise_tr);
    cr.TR1help=find(r.rise_tr_cut>0.5*cr.maxvolt);
    cr.TR1r=t.rise_cut(cr.TR1help(1,1));
else
    r.rise_tr=r.rise;
    r.rise_tr_cut=r.rise_tr(start_rise:end);
    cr.maxvolt=max(r.rise_tr);
    cr.TR1help=find(r.rise_tr_cut>0.5*cr.maxvolt);
    cr.TR1r=t.rise_cut(cr.TR1help(1,1));
end;

p.rise_tr=p.rise;
p.rise_tr_cut=p.rise_tr(start_rise:end);
cr.maxvolt_puls=mean(p.rise(start_rise(1,1)+100:start_rise(1,1)+200,1),1);
cr.pulshaelfte=find(p.rise_tr_cut>0.5*cr.maxvolt_puls);
cr.TR1p=t.rise_cut(cr.pulshaelfte(1,1));

cr.TR1=cr.TR1r-cr.TR1p;

%%% Datenbereich für Plot der Transitzeit

for i=1:length(r.rise_cut)-5
    cr.Abstand_rise(i,1)=r.rise_cut(i+5,1)-r.rise_cut(i,1);
end;

```



```

cf.NormMax_fall=find(cf.veldistr_fall_norm==1);
cf.NormMaxVel_fall=t.velocity_fall_distr(cf.NormMax_fall(1,1));

%%% v(Vert-start)

if lokmaxraus_fall==1

    for x=(cf.rauschen+100):(length(cf.veldistr_fall_cut-4))
        if cf.veldistr_fall_cut(x,1)<10E6 && cf.veldistr_fall_cut(x+1,1)<10E6 &&
cf.veldistr_fall_cut(x+2,1)<10E6 && cf.veldistr_fall_cut(x+3,1)<10E6 &&
cf.veldistr_fall_cut(x,1)>0 && cf.veldistr_fall_cut(x+1,1)>0 && cf.veldistr_fall_cut(x+2,1)>0
            cf.Endwertfinder=x;
            break;
        else
            continue
        end;
    end;
    cf.End_fall=t.velocity_fall_distr(x,1);

else % Normalfall

    for x=(cf.rauschen+100):(length(cf.veldistr_fall_cut-4))
        if cf.veldistr_fall_cut(x,1)<10E4 && cf.veldistr_fall_cut(x+1,1)<10E4 &&
cf.veldistr_fall_cut(x+2,1)<10E4 && cf.veldistr_fall_cut(x+3,1)<10E4 &&
cf.veldistr_fall_cut(x,1)>0 && cf.veldistr_fall_cut(x+1,1)>0 && cf.veldistr_fall_cut(x+2,1)>0
            cf.Endwertfinder=x;
            break;
        else
            continue
        end;
    end;
    cf.End_fall=t.velocity_fall_distr(x,1);
end;

%%% Breite der Verteilung an den Stellen 0,25/0,5/0,75 MA2

cf.veldistr_fall_norm_sm=cf.veldistr_fall_norm;

%   %%% Viertelwert
cf.Viertelwert_fall=find(cf.veldistr_fall_norm_sm>=0.25 & cf.veldistr_fall_norm_sm<=0.35);
cf.GetViertelwertV1_fall=t.velocity_fall_distr(cf.Viertelwert_fall(1,1));

cf.ViertelwertV2_finden=find(cf.Viertelwert_fall>cf.Viertelwert_fall(1,1)+in.vaf);

cf.GetViertelwertV2_fall=t.velocity_fall_distr(cf.Viertelwert_fall(cf.ViertelwertV2_finden(1,1),1));
cf.Viertelwertsbreite_fall=cf.GetViertelwertV2_fall-cf.GetViertelwertV1_fall;

cf.deltafrontingViertel=cf.GetViertelwertV2_fall-cf.NormMaxVel_fall;
cf.deltatailingViertel=cf.NormMaxVel_fall-cf.GetViertelwertV1_fall;

if cf.deltafrontingViertel>cf.deltatailingViertel
    cf.VertFormViertel='Fronting';
elseif cf.deltafrontingViertel==cf.deltatailingViertel
    cf.VertFormViertel='Gauss';
else
    cf.VertFormViertel='Tailing_';
end;

%%% Halbwert
cf.Halbwert_fall=find(cf.veldistr_fall_norm_sm>=0.5 & cf.veldistr_fall_norm_sm<=0.6);
cf.GetHalbwertV1_fall=t.velocity_fall_distr(cf.Halbwert_fall(1,1));

cf.HalbwertV2_finden=find(cf.Halbwert_fall>cf.Halbwert_fall(1,1)+in.haf);

cf.GetHalbwertV2_fall=t.velocity_fall_distr(cf.Halbwert_fall(cf.HalbwertV2_finden(1,1),1));
cf.Halbwertsbreite_fall=cf.GetHalbwertV2_fall-cf.GetHalbwertV1_fall;

cf.deltafrontingHalb=cf.GetHalbwertV2_fall-cf.NormMaxVel_fall;
cf.deltatailingHalb=cf.NormMaxVel_fall-cf.GetHalbwertV1_fall;

if cf.deltafrontingHalb>cf.deltatailingHalb
    cf.VertformHalb='Fronting';
elseif cf.deltafrontingHalb==cf.deltatailingHalb
    cf.VertformHalb='Gauss';

```

```

else
    cf.VertformHalb='Tailing_';
end;

%%% Dreiviertelwert
cf.Dreiviertelwert_fall=find(cf.veldistr_fall_norm_sm>=0.75 &
cf.veldistr_fall_norm_sm<=0.85);
cf.GetDreiviertelwertV1_fall=t.velocity_fall_distr(cf.Dreiviertelwert_fall(1,1));

cf.DreiviertelwertV2_finden=find(cf.Dreiviertelwert_fall>cf.Dreiviertelwert_fall(1,1)+in.daf);

cf.GetDreiviertelwertV2_fall=t.velocity_fall_distr(cf.Dreiviertelwert_fall(cf.DreiviertelwertV
2_finden(1,1),1));
cf.Dreiviertelwertsbreite_fall=cf.GetDreiviertelwertV2_fall-cf.GetDreiviertelwertV1_fall;

cf.deltafrontingDreiviertel=cf.GetDreiviertelwertV2_fall-cf.NormMaxVel_fall;
cf.deltatailingDreiviertel=cf.NormMaxVel_fall-cf.GetDreiviertelwertV1_fall;

if cf.deltafrontingDreiviertel>cf.deltatailingDreiviertel
    cf.VertformDreiviertel='Fronting_';
elseif cf.deltafrontingDreiviertel==cf.deltatailingDreiviertel
    cf.VertformDreiviertel='Gauss_';
else
    cf.VertformDreiviertel='Tailing_';
end;

%Fläche unter der Kurve

cf.Flaechenstart_fall=find(cf.veldistr_fall_norm>0.01); % schneide die ersten Rauschwerte
ab
cf.Flaechenende_fall=x;

cf.veldistr_fall_flaechenraender=cf.veldistr_fall_cut(cf.Flaechenstart_fall(1,1):cf.Flaechenen
de_fall,1);
t.velocity_fall_flaechenraender=t.velocity_fall_distr(cf.Flaechenstart_fall(1,1):cf.Flaechenen
de_fall,1);

cf.Flaeche_fall2=trapz(t.velocity_fall_flaechenraender, cf.veldistr_fall_flaechenraender);

cf.AnzahlLT=cf.Flaeche_fall2;

if cf.AnzahlLT(1,1)==0
    display('Fehler bei Flaechenberechnung fall');
end;

% % TR1: 50% Max-Wert

r.fall_tr=r.fall;
r.fall_tr(r.CH2V_maxplace-2:end)=r.fall_tr(r.CH2V_maxplace-2:end)-
r.CH2V(r.CH2V_minplace(1,1)+4);
cf.maxvolt=max(r.fall_tr);
cf.TR1help=find(r.fall_tr<0.5*cf.maxvolt);
cf.TR1r=t.fall_nNP_pl(cf.TR1help(1,1));

p.fall_tr=p.fall;
cf.maxvolt_puls=mean(p.fall(300:400,1),1);
cf.pulshaelfte=find(p.fall_tr<0.5*cf.maxvolt_puls);
cf.TR1p=t.fall_nNP_pl(cf.pulshaelfte(1,1));

cf.TR1=cf.TR1r-cf.TR1p;

r.fall_pl_cut=r.fall_pl(1:end);
t.fall_nNP_pl_cut=t.fall_nNP_pl(1:end);
r.fall_cut=r.fall(200:end);

%
TRplot_fall=figure;
hold on;
plot(t.fall_nNP_pl_cut,r.fall_pl_cut,'k');
plot(double(subs(t.fall_nNP_pl(cf.TR1help(1,1),1))),
double(subs(r.fall_pl(cf.TR1help(1,1),1))), 'ro');

xlabel('Zeit [s]', 'FontSize', 12); %Achsenbeschriftung
ylabel('Spannung [V]', 'FontSize', 12);
title('Transitzeiten - Fall', 'FontSize', 16);
legend('Transiente Antwort', 'Transitzeit 1', 'Location', 'northeast');

```

```

% Erstelle Tabelle mit den erhaltenen Kennwerten und speicher sie als .txt

tv.NormMaxVel(1,1)=cr.NormMaxVel_rise(1,1);
tv.NormMaxVel(2,1)=cf.NormMaxVel_fall(1,1);
tv.End(1,1)=cr.End_rise(1,1);
tv.End(2,1)=cf.End_fall(1,1);
tv.Viertelwertsbreite(1,1)=cr.Viertelwertsbreite_rise(1,1);
tv.Viertelwertsbreite(2,1)=cf.Viertelwertsbreite_fall(1,1);
tv.Halbwertsbreite(1,1)=cr.Halbwertsbreite_rise(1,1);
tv.Halbwertsbreite(2,1)=cf.Halbwertsbreite_fall(1,1);
tv.Dreiviertelwertsbreite(1,1)=cr.Dreiviertelwertsbreite_rise(1,1);
tv.Dreiviertelwertsbreite(2,1)=cf.Dreiviertelwertsbreite_fall(1,1);
tv.AnzahlLT(1,1)=cr.AnzahlLT(1,1);
tv.AnzahlLT(2,1)=cf.AnzahlLT(1,1);
tv.Transitzeit1(1,1)=cr.TR1(1,1);
tv.Transitzeit1(2,1)=cf.TR1(1,1);
tv.FrontingViertel(1,1)=cr.deltafrontingViertel(1,1);
tv.FrontingViertel(2,1)=cf.deltafrontingViertel(1,1);
tv.FrontingHalb(1,1)=cr.deltafrontingHalb(1,1);
tv.FrontingHalb(2,1)=cf.deltafrontingHalb(1,1);
tv.FrontingDreiviertel(1,1)=cr.deltafrontingDreiviertel(1,1);
tv.FrontingDreiviertel(2,1)=cf.deltafrontingDreiviertel(1,1);
tv.TailingViertel(1,1)=cr.deltatailingViertel(1,1);
tv.TailingViertel(2,1)=cf.deltatailingViertel(1,1);
tv.TailingHalb(1,1)=cr.deltatailingHalb(1,1);
tv.TailingHalb(2,1)=cf.deltatailingHalb(1,1);
tv.TailingDreiviertel(1,1)=cr.deltatailingDreiviertel(1,1);
tv.TailingDreiviertel(2,1)=cf.deltatailingDreiviertel(1,1);
tv.VertFromDreiviertel=[cr.VertformDreiviertel;cf.VertformDreiviertel];
tv.VertFromHalb=[cr.VertformHalb;cf.VertformHalb];
tv.VertFormViertel=[cr.VertFormViertel; cf.VertFormViertel];
tv.Transistor=[s.name_rise;s.name_fall];

    tabl=table(tv.Transistor,          tv.NormMaxVel,          tv.End,          tv.Viertelwertsbreite,
tv.Halbwertsbreite,tv.Dreiviertelwertsbreite,          tv.FrontingViertel,          tv.FrontingHalb,
tv.FrontingDreiviertel,          tv.TailingViertel,          tv.TailingHalb,          tv.TailingDreiviertel,
tv.VertFormViertel, tv.VertFromHalb, tv.VertFromDreiviertel, tv.AnzahlLT, tv.Transitzeit1,
'VariableNames',{'TR','v_LTmax','v_Vert_sat','Breite_25','Breite_50','Breite_75','Fronting_25',
'Fronting_50','Fronting_75','Tailing_25','Tailing_50','Tailing_75','VertFrom_25','VertFrom_50',
'VertFrom_75','AnzahlLT','Transitzeit1'});

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PLOTS %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

rise=figure('units','normalized','position',[0,0,1,1]);
    hold on;%damit alle Plots in einem Digramm landen
    subplot(2,2,1);
    [vpr,Uepr,Uapr]=plotyy(t.rise_cut_pl,p.rise_cut_pl,t.rise_cut_pl,r.rise_cut_pl);
    Uepr.Color='b';
    Uapr.Color='r';
    Uepr.LineWidth=2;
    Uapr.LineWidth=2;
    xlabel('Zeit / s','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
    ylabel('Spannung / V','FontSize',12);
    title('Puls und Antwort - Rise','FontSize', 16);

figure2=figure;
    subplot(2,2,2);
    plot(t.rise_cut_pl,d.rise_cut_pl,'r','LineWidth',2);
    xlabel('Zeit / s','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
    ylabel('dI/dt / As^-1','FontSize',12);
    title('Ableitung - Rise','FontSize', 16);
    alte_limits_rise = axis;
    axis([-0.00002 0.0002 alte_limits_rise(3) alte_limits_rise(4)]);

figure4=figure;
    subplot(2,2,4);
    plot(t.velocity_rise_distr,cr.veldistr_rise_cut,'r','LineWidth',2);
    hold on;
    patch(t.velocity_rise_distr,cr.veldistr_rise_cut,'b','LineWidth',0.5)
    xlabel('Geschwindigkeit / ms^-1','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
    ylabel('dN/dv / 1/m/s','FontSize',12);
    title('Geschwindigkeitsverteilung - Rise','FontSize', 16);
    alte_limits_rise = axis;
    axis([0 10 alte_limits_rise(3) alte_limits_rise(4)]);

figure3=figure;

```



```

subplot(2,2,3);
plot(t.velocity_rise_distr,cr.veldistr_rise_norm,'r','LineWidth',2);
xlabel('Geschwindigkeit / ms^-1','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
ylabel('dN/dv / a.u.','FontSize',12);
title('Normierte Geschwindigkeitsverteilung - Rise','FontSize', 16);
axis([-0 10 0 1]);

fall=figure('units','normalized','position',[0,0,1,1]);
hold on;%damit alle Plots in einem Digramm landen
subplot(2,2,1);
[vpf,Uepf,Uapf]=plotyy(t.fall_nNP_pl,p.fall_pl,t.fall_nNP_pl,r.fall_pl);
Uepf.Color='b';
Uapf.Color='r';
Uepf.LineWidth=2;
Uapf.LineWidth=2;
xlabel('Zeit / s','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
ylabel('Spannung / V','FontSize',12);
title('Puls und Antwort - Fall','FontSize', 16);

%figure2=figure;
subplot(2,2,2);
plot(t.fall_nNP_pl,d.fall_pl,'r','LineWidth',2);
xlabel('Zeit / s','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
ylabel('dI/dt / As^-1','FontSize',12);
title('Ableitung - Fall','FontSize', 16);
alte_limits_fall = axis;
axis([-0.00002 0.0003 alte_limits_fall(3) alte_limits_fall(4)]);

%figure4=figure;
subplot(2,2,4);
plot(t.velocity_fall_distr,cf.veldistr_fall_cut_sm,'r','LineWidth',2);
hold on;
patch(t.velocity_fall_distr,cf.veldistr_fall_cut,'b','LineWidth',0.5)
xlabel('Geschwindigkeit / ms^-1','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
ylabel('dN/dv / 1/m/s','FontSize',12);
title('Geschwindigkeitsverteilung - Fall','FontSize', 16);
alte_limits_fall = axis;
axis([0 10 alte_limits_fall(3) alte_limits_fall(4)]);

%figure3=figure;
subplot(2,2,3);
plot(t.velocity_fall_distr,cf.veldistr_fall_norm,'r','LineWidth',2);
xlabel('Geschwindigkeit / ms^-1','FontSize',12); %Achsenbeschriftung
ylabel('dN/dv norm. / a.u.','FontSize',12);
title('Normierte Geschwindigkeitsverteilung - Fall','FontSize', 16);
axis([-0 10 -0 1]);

%%%%%%%%%%%%% SPEICHERN LÖSCHEN SCHLIEßEN %%%%%%%%%%%%%%

s.aktuell=pwd;
cd(s.Speicherort);
mkdir(s.AuswertungsOrdner);
addpath(genpath(pwd));
cd(fullfile(s.AuswertungsOrdner));

saveas(Messkurve,s.name_Messkurve, 'tif');
saveas(Messkurve,s.name_Messkurve, 'fig');
saveas(TRplot_rise,s.name_rise_fit, 'tif');
saveas(TRplot_rise,s.name_rise_fit, 'fig');
saveas(TRplot_fall,s.name_fall_fit, 'tif');
saveas(TRplot_fall,s.name_fall_fit, 'fig');
saveas(fall,s.name_fall, 'tif');
saveas(rise,s.name_rise, 'tif');
saveas(fall,s.name_fall, 'fig');
saveas(rise,s.name_rise, 'fig');
writetable(tabl,s.Textdateiname,'Sheet',1,'Range','A1');
display(j);
display('gespeichert');

close all;

clearvars A B C fall_stop i j m Messkurve n q rise start_fall start_rise;
clearvars startpunkt_fall startpunkt_korrekturwert Uapf Uapr Uepf Uepr vpf vpr x;

save(s.TR);

```

```

cd(s.aktuell);
end;
clear all;

```

A.5. Sonstiges

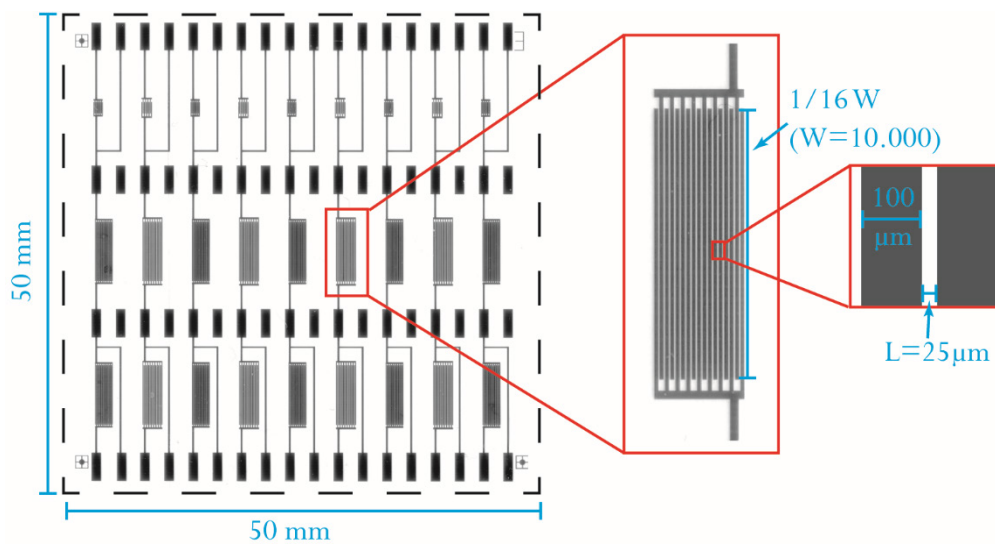


Abbildung A.16: Schaltungssubstrat mit Layout 3 sowie Maße des Substrat und der Elektroden.

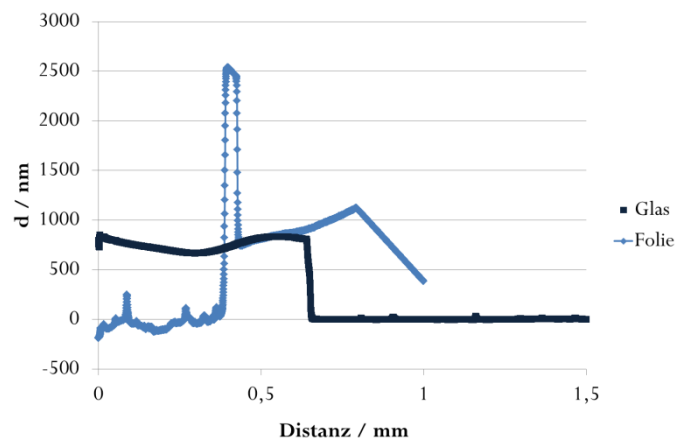


Abbildung A.17: Schichtdickenmessung an Folie und Glas im Vergleich am Beispiel einer Probe von D320#C (80 L/cm 3 Schichten). Durch die Welligkeit der Folie kommt es zu Messartefakten, wie hier ab ca. 0,8 mm zu erkennen.

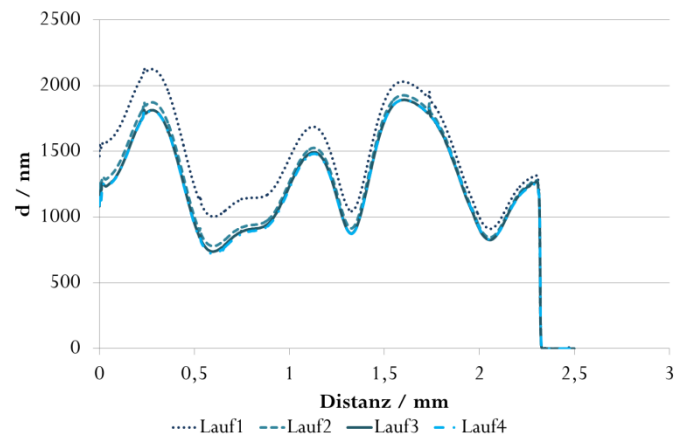


Abbildung A.18: Mehrmaliges Messen an der gleichen Stelle mit einem DektakXT. Aufgrund der geringen Härte des Materials, kann die Diamantspitze während des Messens in die Schicht eindringen. Die Schichtdickenabnahme während vier Durchläufen wird hier an einer Probe von D320#C (80 L/cm 4 Schichten) gezeigt.